

UNIVERSITE DU QUEBEC

MEMOIRE
PRESENTE A
L'UNIVERSITE DU QUEBEC A MONTREAL
COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAITRISE EN BIOLOGIE

par

SYLVAIN ARCHAMBAULT

LES CEDRES BLANCS (Thuja occidentalis L.) A GRANDE LONGEVITE
DU LAC DUPARQUET, ABITIBI:
UNE ETUDE DENDROCLIMATIQUE ET ECOLOGIQUE

JUIN 1989





Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue
Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue

Mise en garde

La bibliothèque du Cégep de l'Abitibi-Témiscamingue et de l'Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue a obtenu l'autorisation de l'auteur de ce document afin de diffuser, dans un but non lucratif, une copie de son œuvre dans Depositum, site d'archives numériques, gratuit et accessible à tous.

L'auteur conserve néanmoins ses droits de propriété intellectuelle, dont son droit d'auteur, sur cette œuvre. Il est donc interdit de reproduire ou de publier en totalité ou en partie ce document sans l'autorisation de l'auteur.

REMERCIEMENTS

J'aimerais remercier tout particulièrement mon directeur, M. Yves Bergeron, pour son assistance constante, ses judicieux conseils et son optimisme légendaire. Toute ma reconnaissance va à Marise Rochefort pour sa participation à l'échantillonnage et pour sa collaboration tout au long du projet. Un sincère merci à Sylvie Gauthier pour son aide stimulante et avec qui ce fut un plaisir de travailler. J'aimerais remercier tout ceux et celles qui m'ont aidé pendant l'échantillonnage ou les travaux de laboratoire: Jacques Tardif, François Tétrault, José Rochefort, Martin Gagné, Pierre Dansereau, Yvan Belouin, Jacques Brisson, Danielle Lalonde et Daniel Lemieux.

Je remercie également le CRSNG pour son appui financier, M. Jacques Miron, du Service de l'Environnement Atmosphérique (Environnement Canada), pour sa grande disponibilité ainsi que M. Jean-Pierre Simon, de l'Université de Montréal, pour l'utilisation de son planimètre.

Finalement, je ne saurais oublier les membres de ma famille pour leur appui constant durant ce projet.

RESUME

La longévité des cèdres blancs (Thuja occidentalis L.) du lac Duparquet (Abitibi, Qué.) dépasse parfois 800 ans sur certains sites xériques. L'étude comporte deux aspects: 1) au niveau dendroclimatique, pour déceler les facteurs climatiques influençant leur croissance radiale et utiliser la largeur des cernes comme indicateur paléoclimatique; 2) au niveau écologique afin de déterminer leur longévité maximale, leur morphologie ainsi que les facteurs abiotiques et historiques contrôlant leur distribution.

Une courbe de croissance standardisée par régressions polynomiales a été réalisée à partir de 38 individus. Cette chronologie de 802 ans, la plus longue pour l'est du Canada, semble montrer un signal climatique puisqu'elle interdate avec une autre chronologie distante de 14 km. Selon des analyses climatiques (fonction de corrélation et fonction de réponse), la croissance radiale serait reliée à une bonne pluviosité ainsi qu'à une température fraîche durant la période de croissance. Ces relations laissent entrevoir la possibilité de retracer les variations de pluviosité dans le nord-ouest du Québec depuis les derniers 800 ans. Ainsi, l'augmentation substantielle des largeurs depuis la fin du Petit Age Glaciaire pourrait être associée à une augmentation des pluies estivales.

Les arbres de plus de 500 ans ont pratiquement tous une petite stature, une forte mortalité apicale, un tronc érodé ainsi qu'une mortalité cambiale conduisant à une croissance unilatérale prononcée. Malgré leur âge, ils maintiennent constant le rapport entre tissus photosynthétiques et non-photosynthétiques. Ils croissent surtout sur des îles ayant échappé aux feux depuis longtemps. Ils y occupent des affleurements rocheux exposés à l'ouest, face aux vents dominants, et sont confinés à une mince bande comprise entre la forêt et la surface du lac. La distribution des vieux cèdres blancs dépendrait donc de l'action du feu et ce n'est que dans quelques refuges qu'il atteint sa longévité maximale.

TABLE DES MATIERES

	Page
REMERCIEMENTS.....	ii
RESUME.....	iii
TABLE DES MATIERES.....	iv
LISTE DES FIGURES.....	vi
LISTE DES TABLEAUX.....	ix
LISTE DES ANNEXES.....	x
 INTRODUCTION GENERALE.....	 1
 CHAPITRE I. DENDROCLIMATOLOGIE DU CEDRE BLANC (<u>Thuja</u> <u>occidentalis</u> L.) AU LAC DUPARQUET (ABI- TIBI, QUEBEC).....	 3
1. Introduction.....	3
2. Région étudiée.....	6
3. Méthodologie.....	9
3.1 Récolte des données.....	9
3.2 Mesure des largeurs et interdatation.....	10
3.3 Standardisation.....	11
3.4 Statistiques descriptives.....	13
3.5 Données météorologiques.....	14
3.6 Relations cernes-climat.....	15
4. Résultats.....	19
4.1 Dendrochronologie.....	19
4.2 Dendroclimatologie.....	27
5. Discussion.....	35
6. Bibliographie.....	44

CHAPITRE II. DISTRIBUTION ET MORPHOLOGIE DES VIEUX CEDRES BLANCS (<u>Thuja occidentalis</u> L.) AU LAC DUPARQUET (ABITIBI, QUE.).....	50
1. Introduction.....	50
2. Région étudiée.....	54
3. Méthodologie.....	57
3.1 Longévité du cèdre blanc.....	57
3.2 Distribution des vieux cèdres blancs.....	58
3.3 Morphologie des vieux cèdres blancs sur sites xériques.....	59
3.4 Régénération sur sites xériques.....	61
4. Résultats.....	61
4.1 Longévité du cèdre blanc.....	61
4.2 Distribution des vieux cèdres blancs.....	65
4.3 Morphologie des vieux cèdres blancs sur sites xériques.....	75
4.4 Régénération sur sites xériques.....	82
5. Discussion.....	85
6. Bibliographie.....	94
CONCLUSION GENERALE.....	99

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Localisation des 16 sites d'échantillonnage(▲) de la chronologie (1186-1987) et du site (●) de la chronologie terrestre (1836-1986). La carte en médaillon indique la localisation des stations météo (IRO=Iroquois Falls, COC=Cochrane, LAS=LaSarre, DUP=Duparquet).....	7
Figure 1.2	Régime de température et de précipitation à LaSarre. Les colonnes représentent la précipitation moyenne mensuelle (neige convertie en équivalent d'eau). Les points avec écarts représentent la température moyenne mensuelle ainsi que les minima et maxima moyens.....	8
Figure 1.3	Chronologie standardisée par régressions polynomiales pour 38 cèdres blancs sur sites xériques au lac Duparquet (1186-1987).....	20
Figure 1.4	Nombre de spécimens contenus dans la chronologie pour chacune des années (1186-1987).....	21
Figure 1.5	Courbe de croissance des largeurs brutes (divisées par la croissance moyenne de chaque arbre).....	22
Figure 1.6	Courbe de croissance des largeurs brutes lissée par une moyenne mobile de 20 ans déplacée par sauts de 10 ans.....	23
Figure 1.7	Comparaison entre la chronologie maîtresse du lac Duparquet et une autre chronologie distante de 14 km (1836-1986).....	28
Figure 1.8	Chronologie résiduelle obtenue par une modélisation autorégressive d'ordre 1 de la chronologie maîtresse (1187-1987).....	30
Figure 1.9	Fonction de corrélation pour la chronologie résiduelle (a. précipitation, b. température). Les lignes pointillées représentent les limites de signification à $p < 0,05$ et $p < 0,01$	31

Figure 1.10	Fonction de réponse pour la chronologie résiduelle (a. précipitation, b. température). Les écarts représentent les limites de confiance à 95%.....	34
Figure 1.11	Comparaison entre la chronologie résiduelle et la valeur maximale de l'Indice de Sécheresse (1er mai au 15 juillet).....	36
Figure 2.1	Localisation des 20 sites comportant des cèdres blancs d'âge estimé supérieur à 500 ans.....	55
Figure 2.2	Structure d'âge a.) des cèdres blancs dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans, b.) des séries de plus de 500 cernes.....	64
Figure 2.3	Date du dernier feu en fonction de l'épaisseur de matière organique recouvrant les premiers charbons. La régression a été calculée à partir des feux dont la date est connue avec précision.....	68
Figure 2.4	Position relative des arbres entre la forêt (0%) et le lac (100%) en fonction de la date du dernier feu.....	71
Figure 2.5	Distribution a.) des cèdres blancs (âge estimé supérieur à 500 ans) en fonction de l'exposition du site. b.) des sites xériques potentiels en fonction de l'exposition.....	73
Figure 2.6	Distribution a.) de la direction des vents et b.) de la vitesse des vents pour la période de mai à août.....	74
Figure 2.7	Evolution de la condition de la cime chez 24 arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.....	77
Figure 2.8	Indice de cambium vivant en fonction de l'âge estimé pour les arbres sur sites xériques.....	79
Figure 2.9	Distribution de l'angle entre l'exposition de l'arbre et l'orientation de la partie de cambium vivant pour les arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.....	80

Figure 2.10 Relation entre la surface foliaire et la surface d'aubier pour 13 arbres sur sites xériques (âge variant de 5 à 756 ans).....	81
Figure 2.11 Relation entre la surface foliaire et la largeur de cambium vivant pour 23 arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.....	83
Figure 2.12 a.) Structure d'âge des jeunes arbres sur sites xériques provenant de régénération sexuée. b.) Régression exponentielle de la structure d'âge. c.) Distribution des résidus de la régression exponentielle et comparaison avec la chronologie maîtresse du cèdre blanc.....	84

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Caractéristiques de la chronologie maîtresse standardisée par régressions polynomiales.....	25
Tableau 1.2	Analyses de variance et de corrélation croisée.....	26
Tableau 1.3	Résultats de l'analyse en composantes principales des données météorologiques et coefficients de la régression multiple.....	32
Tableau 2.1	Liste des arbres dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans.....	63
Tableau 2.2	Répartition des spécimens de plus de 500 ans sur les îles et les berges du lac Duparquet.....	65
Tableau 2.3	Historiques de feu pour les sites comportant des arbres dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans.....	67
Tableau 2.4	Position des cèdres blancs de plus de 500 ans par rapport à la marge de la forêt et à la surface du lac.....	70
Tableau 2.5	Caractéristiques morphologiques des cèdres blancs de plus de 500 ans sur sites xériques.....	75
Tableau 2.6	Records de longévité pour <u>Thuja occidentalis</u>	85

LISTE DES ANNEXES

Annexe A	Estimation des observations météorologiques manquantes à Iroquois Falls (Ont.) à partir de celles de Cochrane (Ont.).....	101
Annexe B	Vérification de l'homogénéité des enregis- trements de précipitation totale mensuelle et de température moyenne à Iroquois Falls (Ont.)....	104
Annexe C	Liste des indices de la chronologie maîtresse (régressions polynomiales).....	107
Annexe D	Liste des indices de la chronologie résiduelle....	111
Annexe E	Exemple de l'estimation de l'âge d'un arbre à partir d'une carotte incomplète.....	115
Annexe F	Droite de régression permettant d'estimer la surface foliaire d'un rameau en fonction de son poids sec.....	117
Annexe G	Droite de régression permettant d'estimer la surface foliaire d'un arbre en fonction de l'estimation visuelle de son volume foliaire.....	119

INTRODUCTION GENERALE

L'enregistrement des données météorologiques ne se fait, d'une façon systématique, que depuis quelques décennies. Il importe donc, si on s'interroge sur les fluctuations climatiques du passé, d'utiliser des preuves indirectes permettant de remonter beaucoup plus loin dans le temps. Les cernes de croissance des arbres sont, à cet égard, un outil privilégié puisque leur largeur varie parfois en fonction des conditions climatiques (Fritts 1976) tandis que la nature annuelle des cernes assure une résolution très précise.

Cette technique, la dendroclimatologie, est cependant limitée par la netteté de la réponse climatique des cernes annuels ainsi que par la rareté des arbres à grande longévité. Ces deux problèmes sont particulièrement aigus dans l'est de l'Amérique du Nord où le climat tempéré réduit l'intensité du signal climatique (Phipps 1982) et où très peu d'arbres dépassent quelques centaines d'années (Cook 1982). La découverte de spécimens de cèdres blancs¹ (Thuja occidentalis L.) de plus de 800 ans en Abitibi (Qué.) est à ce point de vue très intéressante puisque ces arbres permettraient de construire la plus longue chronologie réalisée dans le nord-est de l'Amérique du Nord et de retracer éventuellement les grandes fluctuations du paléoclimat régional.

¹ Les noms vernaculaires français sont tirés de Hosie (1978).

D'autre part, on connaît encore peu de choses sur la longévité des arbres (Westing 1964; Beasley et Klemmedson 1980). Ainsi, certaines espèces comme Pinus longaeva Bailey dépassent à l'occasion 4000 ans (Beasley et Klemmedson 1973) alors que d'autres comme Betula populifolia Marsh. sont déjà vieilles à 50 ans (Kramer et Kozlowski 1979). Ces écarts peuvent avoir une explication génétique mais l'environnement pourrait aussi jouer un rôle puisque, au sein d'une même espèce, les plus vieux individus proviennent souvent de sites très stressants où la croissance est réduite (Schulman 1954; LaMarche 1969). Finalement, la fréquence des perturbations est aussi à considérer puisqu'elle permet à l'arbre, au delà de considérations génétiques ou édaphiques, d'atteindre ou non un âge avancé (Pruden et al. 1976).

Les vieux cèdres blancs découverts au lac Duparquet seront étudiés d'abord dans une optique dendroclimatique. Une chronologie aussi longue que possible sera construite et analysée afin de déceler les influences du climat sur la croissance radiale. Ces relations permettront ensuite d'inférer les grandes tendances du paléoclimat régional. Dans un deuxième temps, l'aspect longévité sera étudié plus en détail en examinant plus spécifiquement la morphologie particulière de ces vieux arbres ainsi que les facteurs environnementaux, édaphiques ou historiques ayant contribué à leur âge avancé.

CHAPITRE I

DENDROCLIMATOLOGIE DU CEDRE BLANC (Thuja occidentalis L.) AU LAC DUPARQUET (ABITIBI, QUE.)

1. Introduction

La croissance radiale des arbres est sous le contrôle d'un ensemble de facteurs comme le climat, les maladies, les défoliations, la compétition ou le vieillissement. Malgré la diversité de ces phénomènes, une même espèce montre parfois des patrons de cernes étonnamment similaires à l'intérieur d'une région, vraisemblablement sous l'influence du climat (Fritts 1976). La dendroclimatology évalue l'action du climat sur les cernes à partir des données météorologiques récentes. Il est ensuite possible d'utiliser de longues séries de cernes pour extrapoler cette interprétation vers l'arrière et retracer les variations climatiques du passé. De nombreuses reconstructions climatiques ont ainsi été réalisées pour des facteurs aussi divers que les précipitations (Blasing et Duvick

1984), la température (Conkey 1986), les degrés jours (Jacoby et al. 1985) ou les périodes de sécheresse (Cook et Jacoby 1977).

Le choix de l'espèce et du site est d'une grande importance: l'espèce doit former des cernes annuels bien définis avec un minimum de cernes anormaux (cernes absents, cernes doubles, etc.). Le site doit, quant à lui, imposer un stress climatique suffisant pour limiter les processus physiologiques de l'arbre (LaMarche 1978). Si c'est le cas, les fluctuations du facteur climatique limitant peuvent être enregistrées de façon proportionnelle dans la largeur des cernes, souvent à l'échelle régionale. Ce sont finalement ces variations communes qui rendent possible l'interdatation¹, condition essentielle à toute étude dendrochronologique (Douglass 1941).

Il existe, au lac Duparquet (Abitibi, Qué.), des populations de cèdres blancs (Thuja occidentalis L.) croissant sur des affleurements rocheux où le drainage est extrêmement rapide. Cette déficience en eau pourrait constituer un stress suffisant pour rendre la largeur des cernes sensible aux fluctuations de pluviosité. L'élaboration d'une chronologie maîtresse (master chronology) devient alors très intéressante puisque certains de ces arbres

¹ Processus par lequel les séries de cernes sont comparées entre elles de façon à identifier des patrons communs de cernes larges ou étroits ou de cernes anormaux (bois final mince ou épais, cernes doubles, etc.). L'interdatation permet de positionner chronologiquement les séries de cernes et d'obtenir ainsi l'année exacte de formation de chacun des cernes.

dépassent 800 ans, ce qui permettrait donc de retracer les grandes tendances de la pluviosité régionale depuis le début du Petit Age Glaciaire.

Le cèdre blanc est mentionné par quelques auteurs (Cook 1982; Jacoby 1982) comme étant une espèce potentiellement utilisable en dendroclimatologie, mais aucune chronologie n'est inscrite à l'International Tree-Ring Data Bank (Allen, comm. pers. 1986). Toutefois, une chronologie non publiée de 578 ans a déjà été réalisée avec succès pour le cèdre blanc aux Monts ChicChocs (Qué.) par Cook (Comm. pers. 1986), tandis que Walker (1987) a examiné les relations croissance-sécheresse dans le sud de l'aire de l'espèce. Il a de plus été démontré que l'interdatation est possible avec les cèdres blancs sur sites xériques au lac Duparquet (Archambault 1986), une indication que des phénomènes climatiques régionaux influencent les largeurs de cernes.

La présente étude vise à apporter quelques éléments permettant de mieux comprendre les fluctuations de pluviosité ayant pu survenir dans l'ouest du Québec depuis les derniers 800 ans. Une longue chronologie du cèdre blanc sur sites xériques est donc développée et analysée afin d'en dégager les relations cernes-climat et d'évaluer son potentiel dendroclimatique. A partir de ces relations il est alors possible de retourner vers l'arrière et de dégager les grandes tendances du paléoclimat régional.

2. Région étudiée

Les arbres utilisés proviennent du lac Duparquet (Fig. 1.1), un plan d'eau situé dans la partie ouest de l'Abitibi (48°28'N 79°17'W). Le lac a une superficie d'environ 50 km² et on peut y observer, en période d'étiage, près de 170 îles variant de quelques mètres² à environ 0,7 km² (Bergeron et Gagnon 1987). Bien que la plus grande partie de la région soit utilisée pour l'agriculture ou l'exploitation forestière, la majorité des îles et des berges du lac Duparquet sont demeurées encore relativement vierges. Les arbres ont été échantillonnés sur des îles et des berges xériques caractérisées par des régosols, sols minces avec présence de la roche en place à moins de 10 cm (Commission Canadienne de Pédologie 1978). Le substrat rocheux est composé principalement de rhyolite, d'andésite ou de quartzite (Diotte et Bergeron 1989).

La station météorologique la plus proche est située à LaSarre, 42 km au nord du lac Duparquet. Les moyennes annuelles de température et de précipitation totale sont de 0,6°C et de 822,7 mm avec une période annuelle moyenne de 64 jours consécutifs sans gel (Anonyme 1982). La pluviométrie relativement faible est surtout concentrée durant la saison de croissance, 77,6% des précipitations annuelles étant sous forme de pluie (Fig. 1.2). Les précipitations y sont généralement suffisantes à la croissance mais l'évaporation peut cependant devenir élevée en juin et juillet (Dermine 1965).

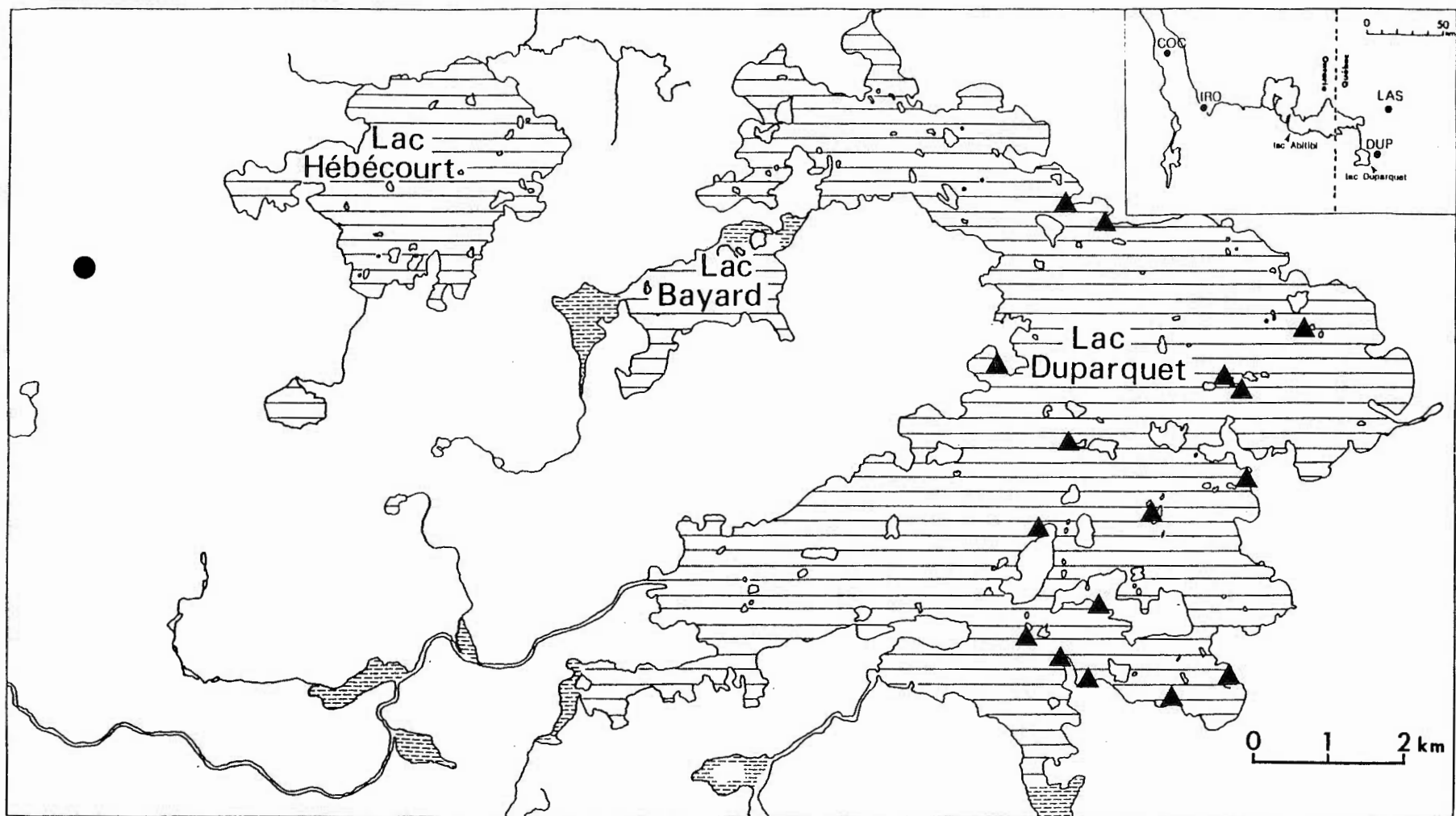


Figure 1.1 Localisation des 16 sites d'échantillonnage (▲) de la chronologie (1186-1987) et du site (●) de la chronologie terrestre (1836-1986). La carte en médaillon indique la localisation des stations météo (IRO = Iroquois Falls, COC = Cochrane, LAS = LaSarre, DUP = Duparquet).

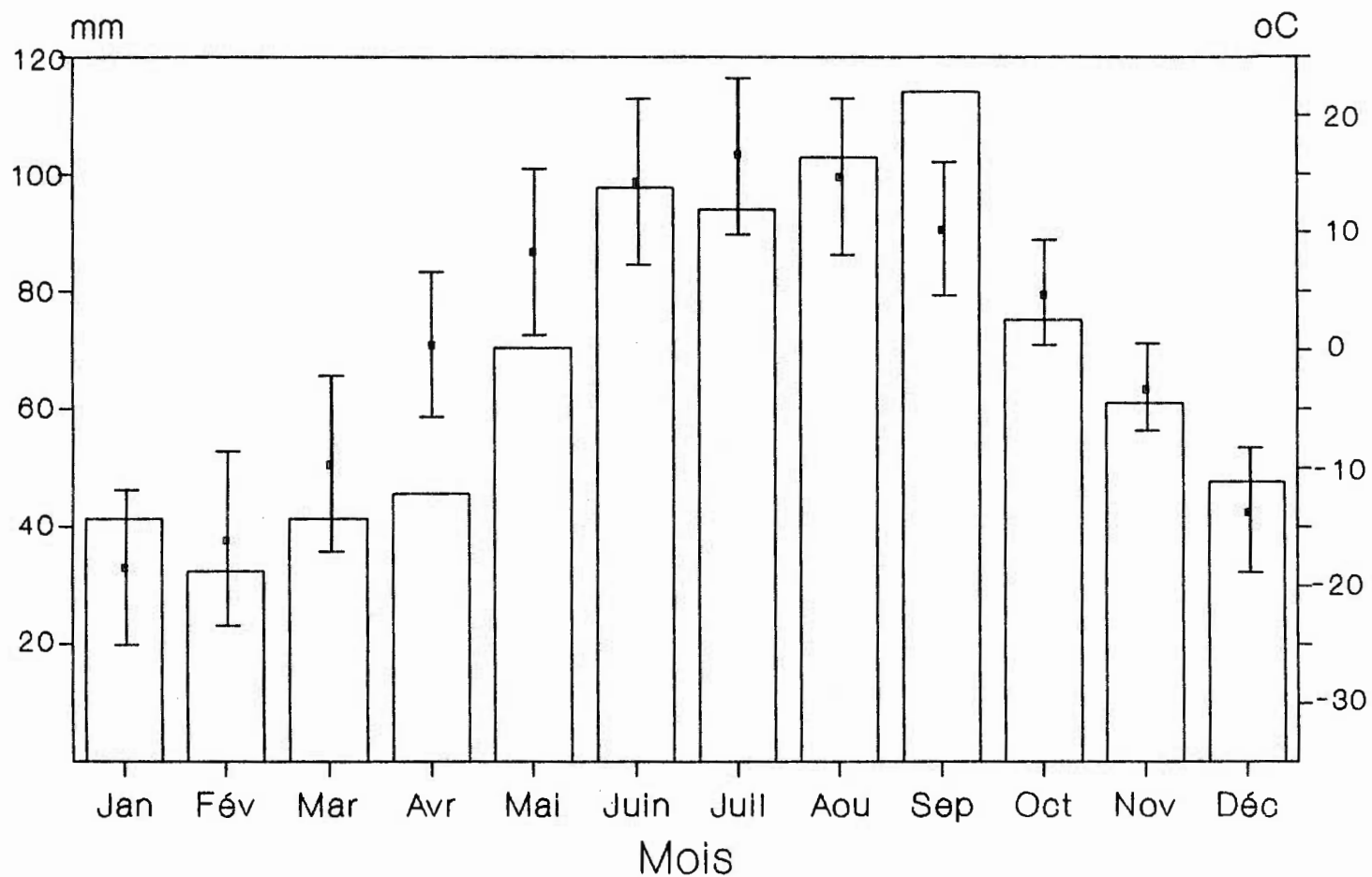


Figure 1.2 Régime de température et de précipitation à LaSarre. Les colonnes représentent la précipitation moyenne mensuelle (neige convertie en équivalent d'eau). Les points avec écarts représentent la température moyenne mensuelle ainsi que les minima et maxima moyens.

La région se trouve à l'extrémité sud de la forêt boréale (Rowe 1972) et à l'intérieur du domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc (Grandtner 1966). Les sites xériques en bordure du lac sont caractérisés par des communautés dominées par Pinus banksiana Lamb. ou Pinus resinosa Ait. qui semblent, en l'absence de feu, évoluer vers des communautés dominées par des espèces plus tolérantes de l'ombre comme Thuja occidentalis et Picea mariana (Mill.) BSP. On observe alors un phénomène d'auto-remplacement par ces deux espèces, ce qui pourrait constituer des forêts climaciques. De plus, les communautés de Thuja occidentalis et de Picea mariana peuvent, en l'absence de pins, apparaître immédiatement après feu (Bergeron et Dubuc 1989).

3. Méthodologie

3.1 Récolte des données

La chronologie a été construite à partir de carottes ou de sections entières provenant de 38 spécimens choisis en fonction des critères suivants: 1) âge maximal, 2) sites xériques, 3) qualité des échantillons et 4) possibilité d'interdatation. A cause de la croissance unilatérale très prononcée de ces arbres, caractère fréquent chez les individus très âgés (Schulman 1954), la chronologie ne comprend qu'un seul rayon par arbre. Les échantillons ont été récoltés dans 16 sites répartis sur une surface d'environ 25 km²

(Fig. 1.1). Les variations de largeur liées à des facteurs propres à chaque site devraient donc s'atténuer tandis que les variations communes (probablement reliées au climat) devraient être maximisées lors de la confection de la chronologie. Afin de vérifier si ces variations communes correspondent effectivement à un signal climatique régional, une autre chronologie comprenant 18 spécimens (32 rayons), moins âgés, mais provenant d'un site xérique situé 14 km à l'intérieur des terres (Fig. 1.1) a été comparée à celle du lac.

3.2 Mesure des largeurs et interdatation

Après préparation des spécimens (montage, ponçage, etc.) (Stokes et Smiley 1968), les largeurs de cernes ont été mesurées avec une précision de $\pm 0,01$ mm grâce à un micromètre Henson. Les spécimens ont ensuite été interdatés afin d'assigner à chaque cerne l'année exacte de sa formation. En comparant visuellement les patrons de cernes d'arbres vivants, de nombreux cernes caractéristiques étroits comme 1602, 1635-1636, 1792, 1841, 1920 et 1944 ou larges comme 1686, 1718, 1802, 1889, 1918 et 1933 ont pu être identifiés et ils ont ensuite permis de dater les arbres morts. Bien que des procédures statistiques aient été développées dans le but de faciliter cette étape (Fritts 1963; Baillie et Pilcher 1973), particulièrement dans les cas où la variabilité des cernes est faible, la méthode visuelle de Douglass (1941) a été préférée. En effet, des problèmes importants se posent lors de l'utilisation des

procédures statistiques avec des séries où l'autocorrélation est élevée (Yamaguchi 1986), ce qui semble être le cas au lac Duparquet. D'après Fritts (1986), ces techniques informatisées ne peuvent complètement remplacer les méthodes visuelles qui sont, finalement, les plus sûres.

3.3 Standardisation

Les séries de largeurs brutes comportent parfois des variations brusques ou monotones reliées à des phénomènes propres à chaque arbre comme les perturbations externes ou le vieillissement. La standardisation a alors pour but d'extraire ces tendances de façon à maximiser le signal de haute fréquence (variations annuelles) qui semble beaucoup mieux corrélé aux fluctuations climatiques annuelles (Hughes et al. 1978). Il est cependant possible qu'en agissant de la sorte on perde une certaine information sur des changements climatiques à long terme (LaMarche 1974; Cook 1985). C'est un compromis qu'il est nécessaire de faire puisque tous les traitements statistiques ultérieurs doivent obligatoirement être effectués sur des séries stationnaires (Legendre et Legendre 1984). Chaque série de largeurs a donc été standardisée en la divisant par une courbe lissée obtenue par une régression polynomiale de faible degré (Fritts 1976). Ce type de fonction, très employé dans les chronologies de l'est de l'Amérique du Nord, permet d'obtenir un ajustement à des courbes de croissance complexes comportant des

fluctuations de basse fréquence (Phipps 1982). Le choix du degré est problématique et il a été fait en examinant à chaque degré n si un des deux polynômes de degré $n+1$ ou $n+2$ augmente la variance expliquée de plus de 5%. Si c'est le cas, on développe le degré $n+1$ et on recommence le test, sinon on se contente du degré n (Graybill 1982). On obtient alors des séries stationnaires d'indices dont la valeur oscille autour de 1,0 et qui accordent le même poids statistique à chacun des arbres (Fritts 1966).

Dans quelques cas, des augmentations brusques de largeur correspondent à des dates de feux connues. Les dates de ces feux ont été déterminées de façon précise grâce à des arbres portant des cicatrices (McBride 1983). Afin de ne pas introduire d'anomalies lors du calcul des régressions polynomiales, ces zones ont été remplacées par des droites et les indices résultants ont été éliminés des séries de cernes, une technique employée par Cropper et Fritts (1981) lorsque des portions de rayon sont inutilisables ou manquantes. Les 38 séries d'indices ont finalement été combinées en une courbe moyenne, la chronologie maîtresse.

Comme la standardisation peut amener la perte d'information sur des changements climatiques à long terme, une courbe moyenne des largeurs brutes a aussi été produite (LaMarche 1974). Cependant, pour ne pas introduire de fluctuations non reliées au climat, les périodes de forte croissance au début de la vie des arbres et toutes

les reprises après feu ont tout simplement été éliminées. Chaque série de largeurs a ensuite été divisée par la croissance moyenne de l'arbre de façon à leur accorder le même poids statistique. La courbe de croissance moyenne a finalement été lissée à l'aide d'une moyenne mobile de 20 ans déplacée par sauts de 10 ans afin de bien mettre en évidence toute tendance à long terme.

3.4 Statistiques descriptives

Quelques paramètres statistiques de routine en dendrochronologie comme la sensibilité moyenne, l'autocorrélation, l'écart type ainsi que le pourcentage de cernes localement absents (Fritts 1976) ont été calculés sur la chronologie maîtresse. L'autocorrélation est une mesure du phénomène de persistance, c'est-à-dire la tendance à retrouver un cerne large après un autre cerne large et vice versa. La sensibilité est, quant à elle, un paramètre spécifique à la dendrochronologie qui indique le changement relatif d'indice entre deux années consécutives sans tenir compte du signe (Fritts 1976). Sa valeur est de 0 lorsque tous les cernes sont semblables et de 2 dans les cas de variabilité maximale.

$$\text{sensibilité} = \frac{\text{indice}_{t+1} - \text{indice}_t}{(\text{indice}_{t+1} + \text{indice}_t)/2}$$

La sensibilité moyenne est alors la moyenne de l'ensemble des sensibilités. Finalement, l'écart type combine à la fois des

éléments de haute et basse fréquence mesurés par la sensibilité et l'autocorrélation (Fritts et Shatz 1975).

Les analyses de variance ANOVA et de corrélation croisée (cross-correlation) permettent d'évaluer le signal commun d'une chronologie et d'en déduire l'intensité du signal climatique (Fritts 1976). Cependant, elles requièrent deux rayons par arbre ainsi qu'une période de temps commune à l'ensemble des spécimens. Comme ces deux conditions sont difficiles à respecter, les analyses de variance et de corrélation croisée peuvent être effectuées sur un sous-échantillon de la chronologie (LaMarche et Stockton 1974). Quatorze spécimens comportant tous une séquence ininterrompue de 100 ans (1888-1987) ont donc été conservés pour ces deux analyses. A cause de la morphologie particulière des arbres, le deuxième rayon utilisé (non retenu dans la chronologie maîtresse) provenait d'une zone relativement restreinte située du même côté de l'arbre.

3.5 Données météorologiques

Bien que la station météorologique la plus rapprochée soit celle de LaSarre (48°48'N 79°12'W, fig. 1.1), elle n'existe que depuis 1952 et contient beaucoup de données manquantes. En effet, 6,9% des valeurs mensuelles pour la température et 8,8% pour la précipitation manquent, ce qui est bien au delà du seuil de 5,0% suggéré par Fritts (1976). Les analyses dendroclimatiques ont donc

été réalisées à partir des données météorologiques provenant d'Iroquois Falls, Ont. ($48^{\circ}45'N$ $80^{\circ}40'W$). Cette station, située 105 km à l'ouest du lac Duparquet, a la particularité d'être en opération depuis 1913, ce qui est exceptionnel pour la région. De plus, très peu de valeurs mensuelles sont manquantes, à peine 1,7% pour la température et 2,0% pour la précipitation. Ces valeurs manquantes ont été par la suite estimées à partir des relevés de la station de Cochrane, Ont. ($49^{\circ}4'N$ $81^{\circ}2'W$). Les valeurs de température ont été obtenues à l'aide de régressions linéaires (Fritts 1976), les valeurs mensuelles communes aux deux stations servant à calibrer l'équation pour chacun des mois de l'année (Annexe A). Les valeurs de précipitation sont, quant à elles, estimées en multipliant la valeur observée à Cochrane par le rapport des précipitations mensuelles moyennes pour un intervalle de temps commun aux deux stations (Annexe A) (Fritts 1976). Finalement, l'homogénéité des enregistrements a été vérifiée d'une façon saisonnière afin de déceler tout changement brusque dû, par exemple, à une relocalisation des appareils (Kohler 1949; Fritts 1976). Comme aucun changement majeur de pente n'est observé dans les valeurs cumulées (Annexe B), on peut conclure à l'homogénéité des enregistrements.

3.6 Relations cernes-climat

Dans la très grande majorité des cas, les chronologies publiées comportent une bonne part d'autocorrélation (Cropper 1982; Monserud

1986), vraisemblablement due à un phénomène de persistance physiologique (Fritts 1976). On croit de plus en plus que cette autocorrélation peut fausser les analyses dendroclimatiques (Cook 1985; Monserud 1986; Yamaguchi 1986) et il est fortement conseillé de l'extraire. Une modélisation ARMA (Autoregressive Moving Average) de la chronologie (Box et Jenkins 1976) a donc été réalisée et les résidus de cette modélisation conservés pour former une nouvelle chronologie sans autocorrélation, la "chronologie résiduelle", qui a été utilisée pour les analyses climatiques.

Deux méthodes ont servi à décrire les relations cernes-climat, la fonction de corrélation (Blasing et al. 1984) ainsi que la fonction de réponse (Fritts et al. 1971; Guiot et al. 1982). Dans les deux cas, la croissance annuelle a été comparée aux températures moyennes mensuelles et à la précipitation totale mensuelle, des variables qui sont facilement disponibles et qui sont employées dans la grande majorité des études dendroclimatiques. Comme le climat de l'année précédente peut parfois influencer la croissance (Fritts 1976), une période de 14 mois a été utilisée, soit de juin de l'année précédente à juillet de l'année courante.

La fonction de corrélation n'est qu'un simple calcul des 28 coefficients de corrélation (r de Pearson) entre les résidus de la modélisation ARMA (chronologie résiduelle) et chacune des 28 variables climatiques. Facile d'interprétation, la fonction de

corrélation est plus simple à reproduire que la fonction de réponse tout en comportant moins de choix subjectifs (Blasing et al. 1984); il est donc recommandé de toujours l'inclure de concert avec la fonction de réponse.

La fonction de réponse est beaucoup plus complexe et consiste essentiellement en une régression multiple pas à pas ("stepwise") avec les données météorologiques mensuelles comme variables indépendantes et la chronologie comme variable dépendante. Un problème de multicollinéarité se pose cependant souvent entre variables climatiques (Fritts 1971; Guyot et al. 1982) et une régression multiple à partir des composantes principales s'avère préférable (Legendre et Legendre 1984). On extrait donc les vecteurs propres des 28 variables climatiques et on obtient ainsi un nouvel ensemble de 28 variables orthogonales. On ne conserve alors que les vecteurs propres les plus importants, les autres représentant surtout la variance liée aux erreurs lors de la prise des données climatiques (Guiot et al. 1982). Le critère de sélection est celui de Guiot et al. (1982) et consiste à garder, en commençant par le premier vecteur propre, ceux dont le produit cumulé des valeurs propres est supérieur à 1,0. Ce sont finalement les amplitudes des vecteurs propres sélectionnés qui ont servi de variables indépendantes dans la régression pas à pas, le quotient F pour entrer une variable étant fixé à 1,0. Comme la plus grande part de

l'autocorrélation est éliminée par la modélisation ARMA, les indices des années précédentes (délai de 1 à 3 ans) n'ont pas servi de variables indépendantes. Les coefficients significatifs de la régression multiple sont ensuite multipliés par la matrice des vecteurs propres les plus importants de façon à obtenir des coefficients (positifs ou négatifs) qui s'appliquent directement aux variables climatiques originales.

La croissance des arbres étant sous l'influence de la température ainsi que des précipitations, il pourrait être intéressant de comparer la croissance annuelle à un indice de sécheresse qui combinerait à la fois ces deux paramètres. La composante Indice de Sécheresse (IS) de l'Indice Forêt-Météo canadien (IFM) représente la teneur en eau des couches profondes de l'humus et est particulièrement bien adaptée aux conditions rencontrées au Canada (Turner 1972; Van Wagner 1987). Cet indice a donc été calculé sur une base journalière (1 mai-30 sept.) pour la période 1913-1987 à partir des relevés quotidiens de température maximale et de précipitation pour Iroquois Falls. Une station météo saisonnière (mai à septembre) a existé au lac Duparquet entre 1940 et 1960, la nature épisodique des relevés a cependant empêché de les utiliser dans les analyses climatiques précédentes. Toutefois, puisqu'ils couvrent la période de mai à septembre, tout comme l'Indice de Sécheresse, ils ont pu être substitués à ceux de Iroquois Falls lors de ce calcul.

4. Résultats

4.1 Dendrochronologie

La chronologie standardisée obtenue (Fig. 1.3; Annexe C) couvre une période de 802 ans et comprend 38 individus (Fig. 1.4) dont l'âge minimum varie de 302 à 779 ans, la vaste majorité (84%) ayant plus de 450 ans. Un certain nombre de spécimens déjà morts ($n=10$) et dans un excellent état de conservation ont pu être intégrés à la chronologie par interdatation. Ceci a permis à la fois d'augmenter l'échantillonnage et d'étendre la période de temps couverte. On remarque, dans la chronologie, des excursions prolongées loin de la moyenne: par exemple, les périodes 1270-1310 ($n=9$ spécimens), 1470-1510 ($n=25$) ou 1792-1799 ($n=37$) ont des croissances inférieures à la moyenne tandis que la longue période 1330-1400 (10 à 18 spécimens) a une croissance relativement élevée. Il faudrait cependant interpréter avec prudence la zone précédant l'an 1232 puisqu'elle ne contient que 2 spécimens.

Les variations de largeurs brutes pour l'ensemble des 38 spécimens sont présentées (Fig. 1.5 et 1.6) afin de déceler l'existence de changements à long terme. Outre deux courtes périodes de faible croissance centrées autour de 1235 et 1490, on observe une grande période (1590 à 1850) où la croissance a été systématiquement inférieure à la normale. Depuis, la croissance montre une nette

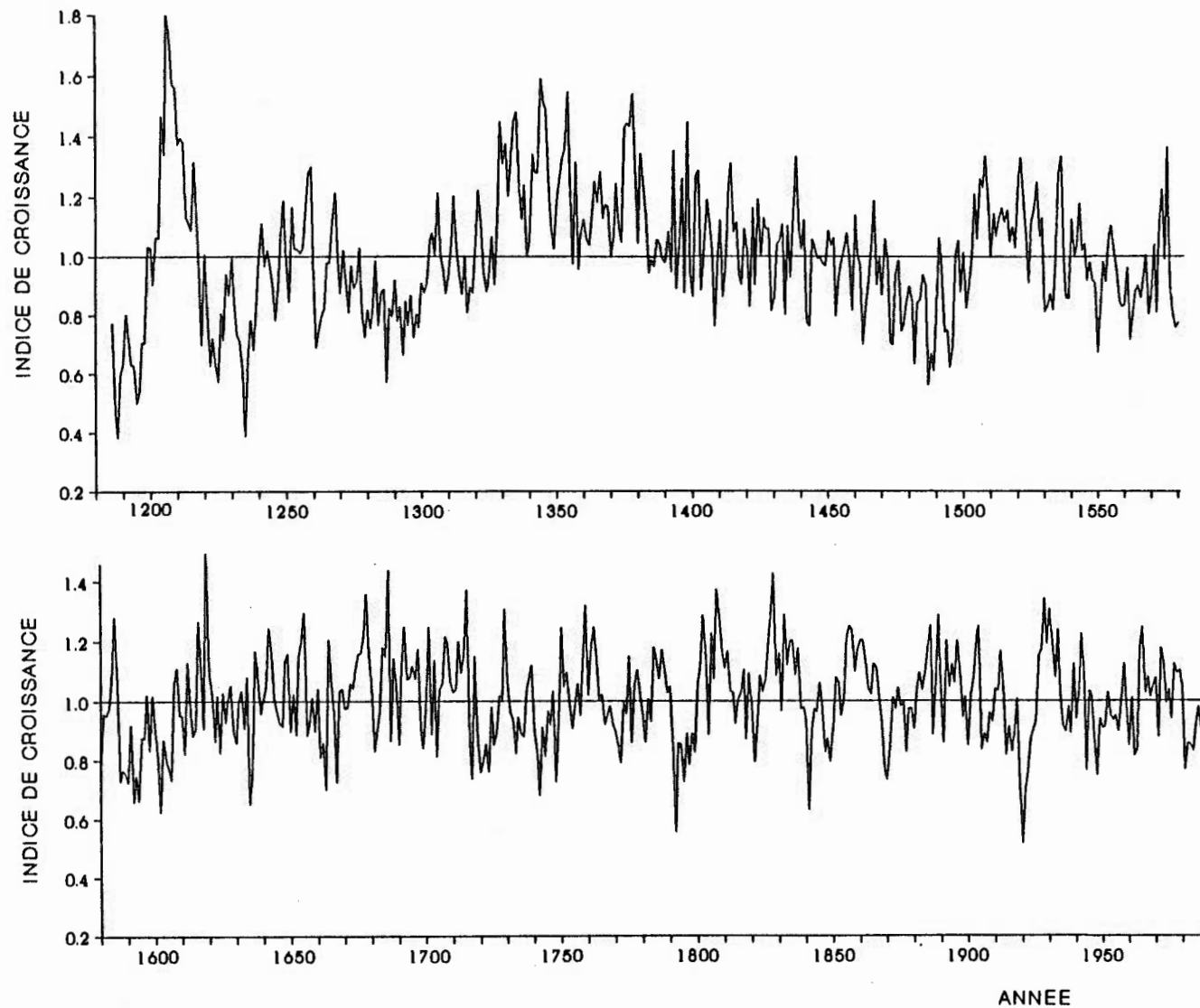


Figure 1.3 Chronologie standardisée par régressions polynomiales pour 38 cèdres blancs sur sites xériques au lac Duparquet (1186-1987).

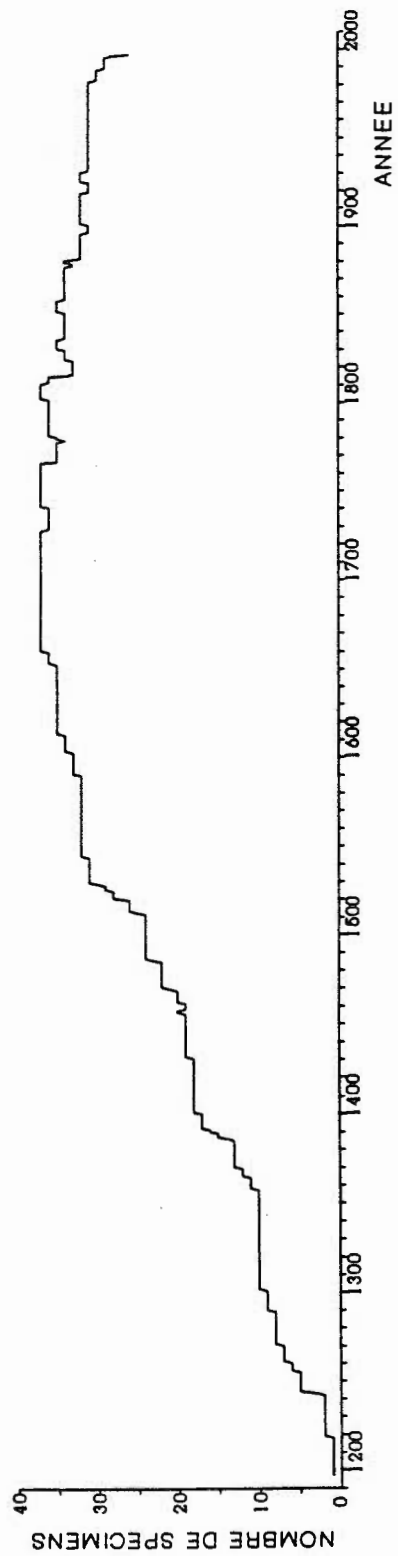


Figure 1.4 Nombre de spécimens contenus dans la chronologie pour chacune des années (1186-1987).

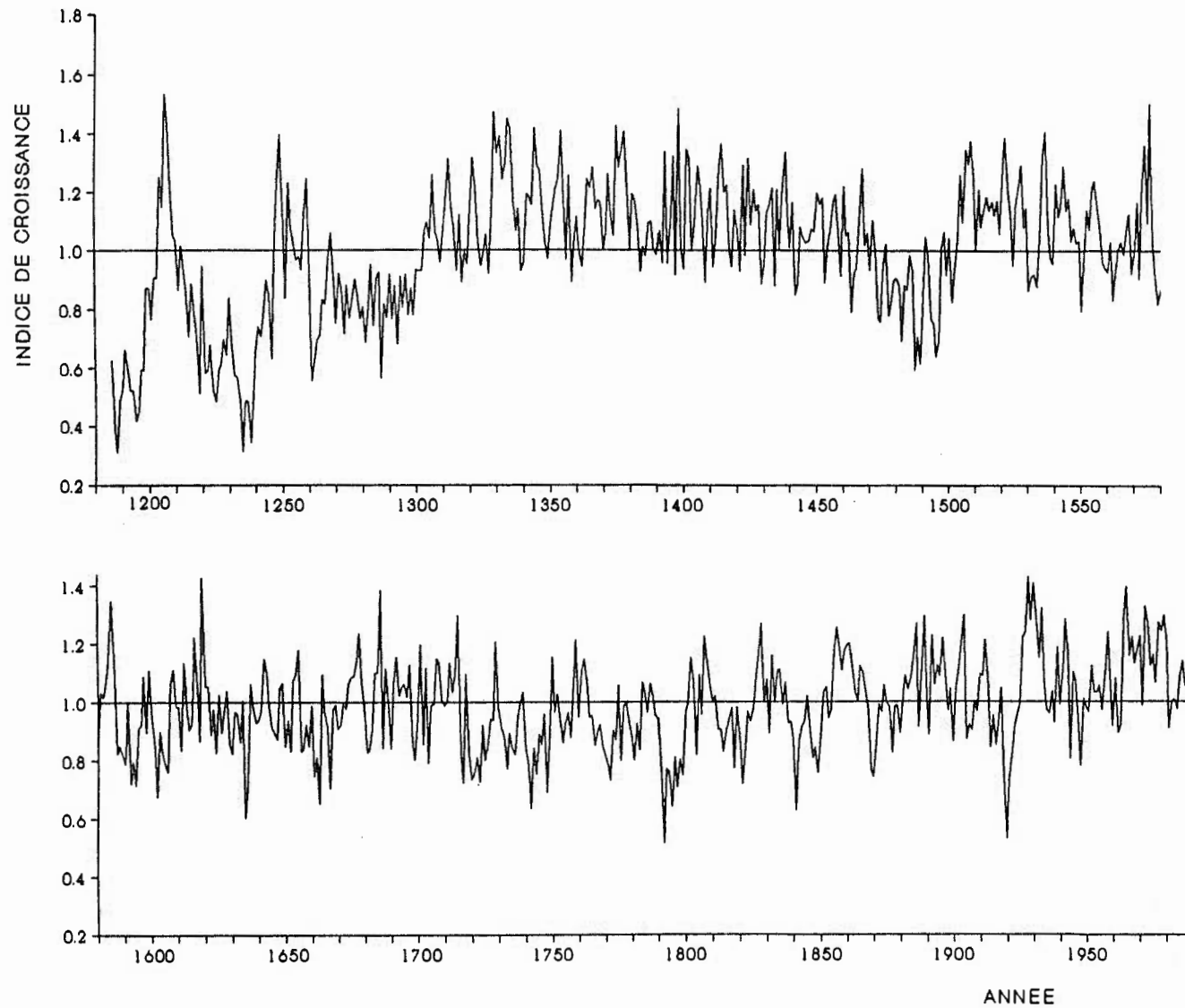


Figure 1.5 Courbe de croissance des largeurs brutes (divisées par la croissance moyenne de chaque arbre).

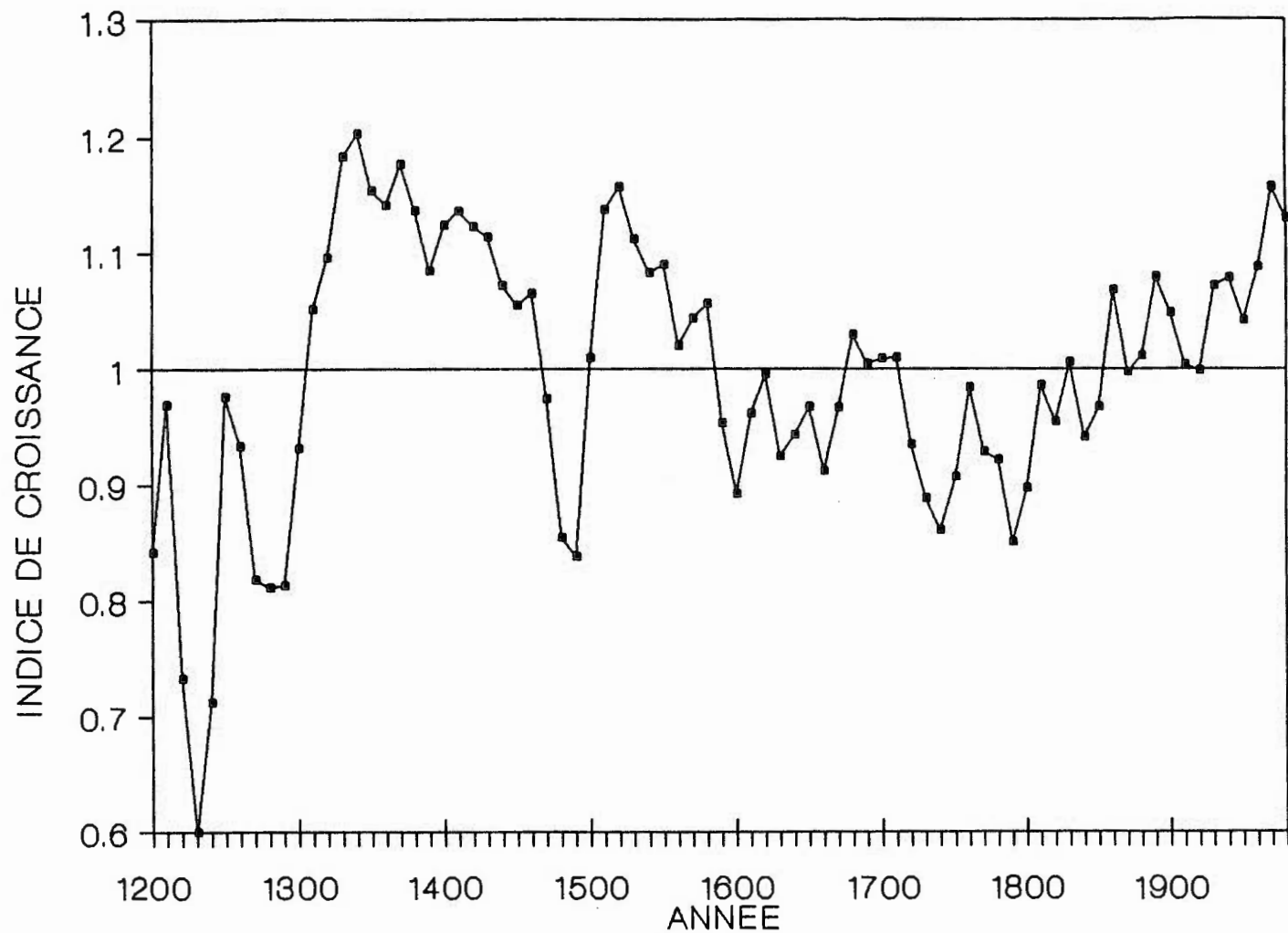


Figure 1.6 Courbe de croissance des largeurs brutes lissée par une moyenne mobile de 20 ans déplacée par sauts de 10 ans.

tendance à la hausse, les cernes des derniers 100 ans étant en moyenne 11,8% plus larges que ceux des 200 années antérieures.

Les arbres intégrés à la chronologie ont des taux de croissance extrêmement faibles, la moyenne des largeurs de cernes annuels étant de 0,36 mm pour l'ensemble de la période (Tableau 1.1). Malgré le niveau de stress élevé chez les arbres de sites xériques, l'ensemble des spécimens ne comporte que six cas de cernes absents (0,02%) ce qui rend l'interdatation relativement simple. Les cernes absents recensés se sont produits en 1310, 1489, 1592, 1602, 1663 ainsi qu'en 1841. Il est à noter que sauf pour 1310 où l'indice est 0,931, tous les cernes absents se sont produits durant des années où la croissance radiale des cèdres blancs était très faible (indice entre 0,608 et 0,701). Les doubles cernes sont remarquablement rares, à peine 12 arbres en montrant (seulement 25 occurrences au total); ils n'ont donc pas compliqué outre mesure la datation. Les diverses statistiques descriptives (Tableau 1.1) indiquent d'autre part que la chronologie est fortement autocorrélée (0,61) tout en ayant une sensibilité et un écart type relativement faibles (0,14 et 0,19).

L'intensité du signal climatique d'une chronologie est souvent évaluée à l'aide de l'analyse de variance ANOVA (Tableau 1.2) (Phipps 1982). Celle-ci montre de quelle façon la variance totale de la chronologie (dans notre cas: sous-échantillon de 14 spécimens,

Tableau 1.1. Caractéristiques de la chronologie totale standardisée
par régressions polynomiales.

=====

Intervalle (A.D.)	1186-1987
Intervalle (années)	802
Nombre d'arbres	38
Largeur moyenne (mm)	0,36
% cernes partiellement absents	0,02
Autocorrélation	0,61
Sensibilité moyenne	0,14
Ecart type	0,19
Erreur type de la moyenne	0,03

Tableau 1.2. Analyses de variance et de corrélation croisée.

=====		
Intervalle (années)	1888-1987 (100 ans)	
Nombre d'arbres		14
Nombre de rayons par arbre		2
<u>Analyse de variance</u>		
	Composante de variance	Pourcentage de la variance de la chronologie
Variance commune à tous les arbres (Y)	0,021	33,6
Variance due à des différences entre les arbres (YT)	0,027	42,1
Variance due à des dif- férences entre les rayons d'un même arbre (YCT)	0,015	24,3
<u>Analyse de corrélation croisée</u>		
Rayons du même arbre		0,76
Rayons d'arbres différents		0,35
Moyennes entre les arbres		0,39

1888-1987) se trouve répartie entre les diverses sources de variation. Elle est exprimée dans le tableau sous sa forme brute ainsi qu'en pourcentage. La variance commune à l'ensemble des arbres est de 33,6% alors que 42,1% de la variance est due à des différences entre les arbres et 24,3% à des différences entre les deux rayons du même arbre. L'intensité de la variance commune, bien qu'elle ne soit pas très élevée, dénote quand même la présence d'un signal climatique évident.

L'analyse de corrélation croisée (Tableau 1.2) indique une très bonne corrélation moyenne ($r=0,76$ $p<0,0001$) entre les deux rayons du même arbre. Les corrélations moyennes entre rayons provenant d'arbres différents (0,35) ou entre les moyennes des 14 arbres (0,39) sont plus faibles mais quand même significatives ($p<0,005$) et démontrent bien l'existence d'un signal commun. Quant à la comparaison entre la chronologie du lac Duparquet et la chronologie terrestre distante de 14 km (Fig. 1.7), elle montre une très bonne similitude ($r=0,63$ $p<0,0001$). On y observe effectivement des patrons de cernes larges et étroits très semblables, une bonne indication de la nature régionale du signal commun observé.

4.2 Dendroclimatologie

Préalablement aux analyses dendroclimatiques, la chronologie maîtresse a été transformée par une modélisation ARMA en une

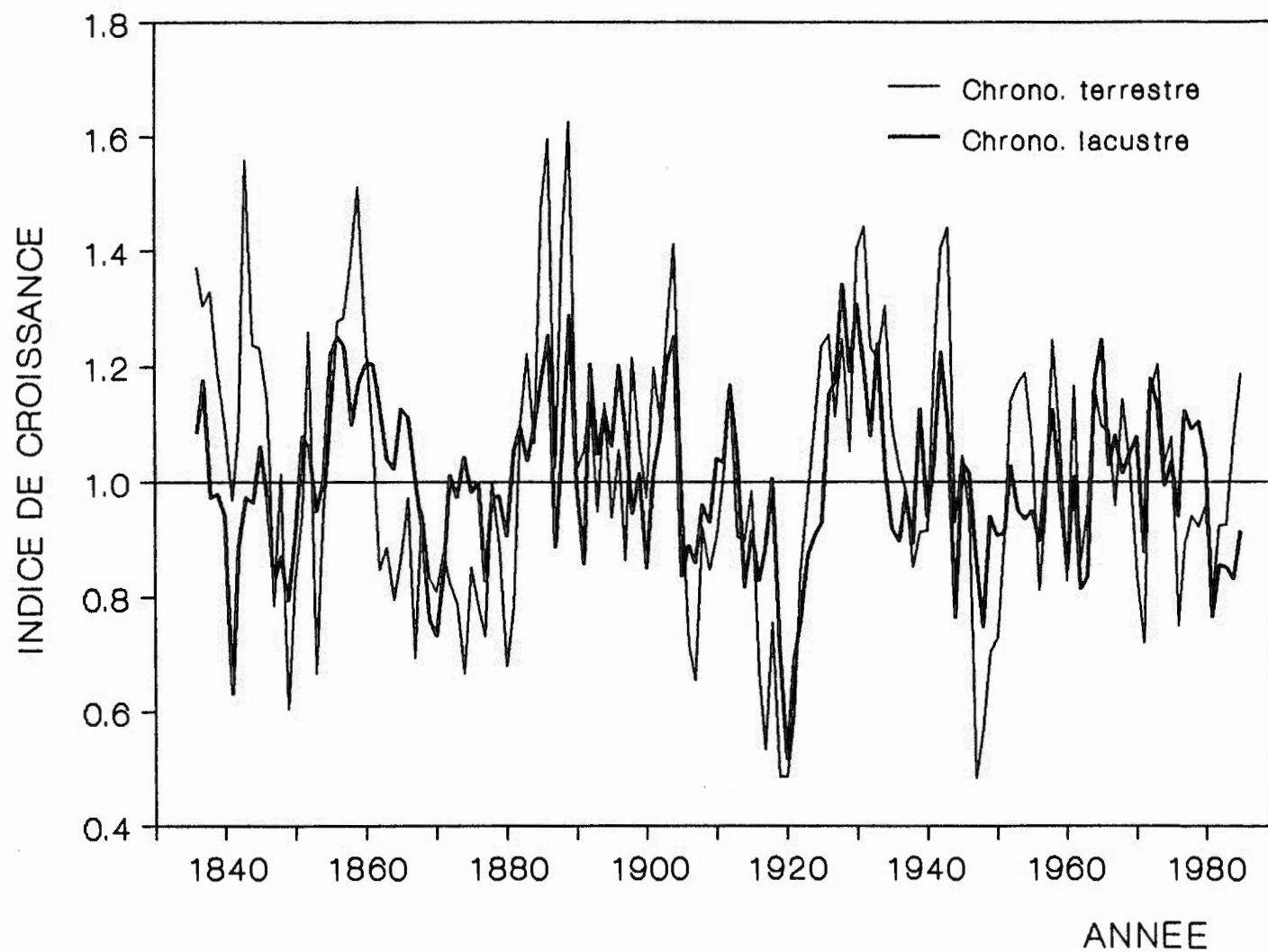


Figure 1.7 Comparaison entre la chronologie maîtresse du lac Duparquet et une autre chronologie distante de 14 km (1836-1986).

chronologie de résidus non autocorrélés. Le modèle retenu est un modèle autorégressif d'ordre 1, AR(1), et il a la forme suivante:

$$z_t = 1,003 + 0,607z_{t-1} + a_t$$

Cette chronologie résiduelle (Fig. 1.8; Annexe D) ne comporte pratiquement plus d'autocorrélation ($r=0,10$) et possède une sensibilité moyenne légèrement plus élevée que la chronologie maîtresse (0,18). Cette façon d'extraire l'autocorrélation est considérée plus adéquate, mathématiquement, que l'utilisation de filtres telle la moyenne mobile (Yamaguchi 1986).

La fonction de corrélation (Fig. 1.9) représente en quelque sorte une image des relations cernes-climat pour chacun des 14 mois considérés. Peu de variables sont corrélées à la chronologie résiduelle, à peine 4 dépassant le seuil de signification de 0,05. Cependant, la précipitation de juin de l'année courante est corrélée de façon hautement significative ($r=0,32$ $p<0,01$) tandis que pour la température du même mois, la relation est inverse. Deux autres corrélations négatives peuvent être observées, soit la précipitation d'avril de l'année courante ainsi que la température d'août de l'année précédente.

Des 28 vecteurs propres obtenus (Tableau 1.3), seuls les 22 premiers ont été conservés pour le calcul de la fonction de réponse, ceux-ci ayant un produit cumulé des valeurs propres de 2,28 et expliquant globalement 93,8% de la variance des données météorolo-

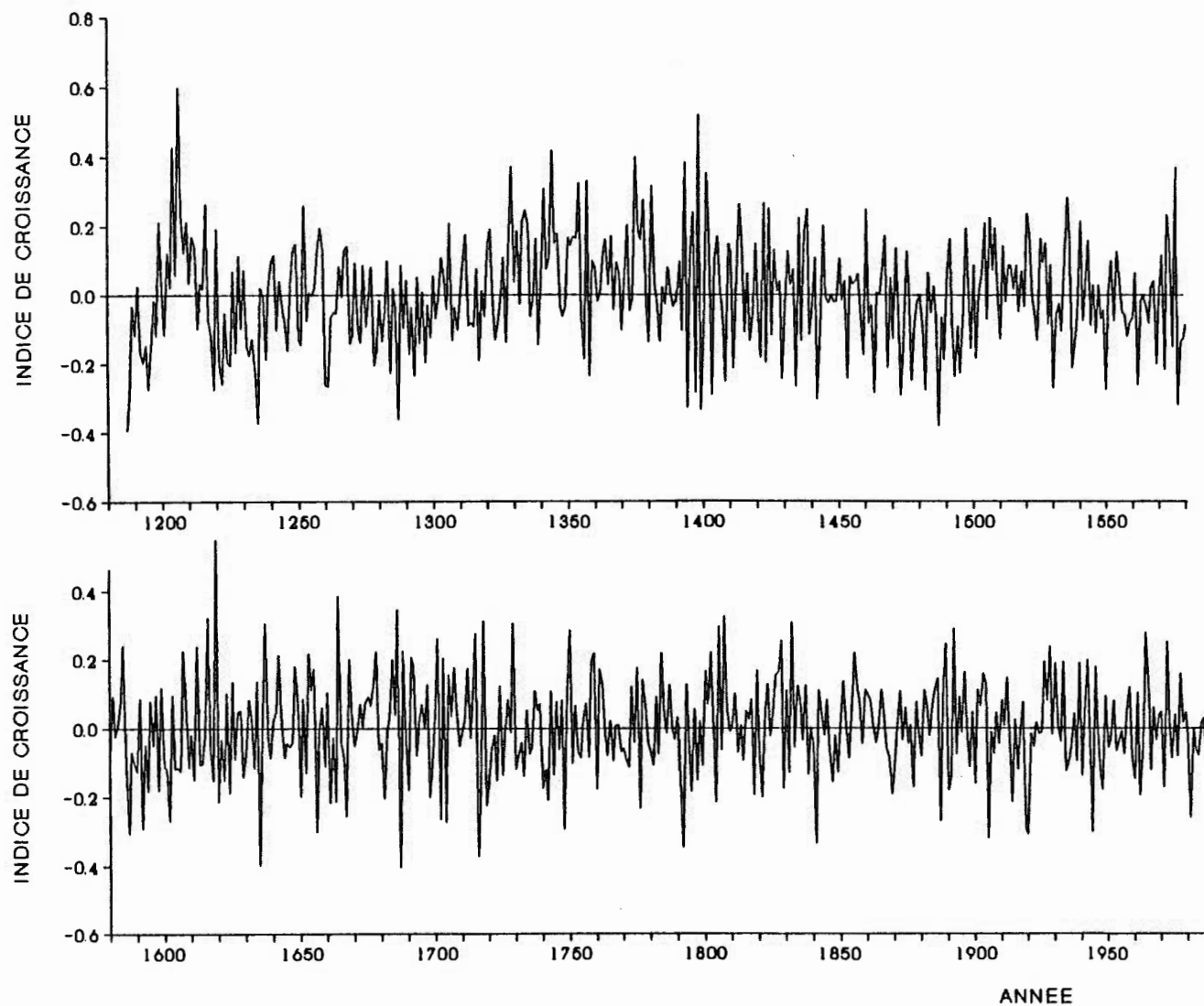


Figure 1.8 Chronologie résiduelle obtenue par une modélisation autorégressive d'ordre 1 de la chronologie maîtresse (1187-1987).

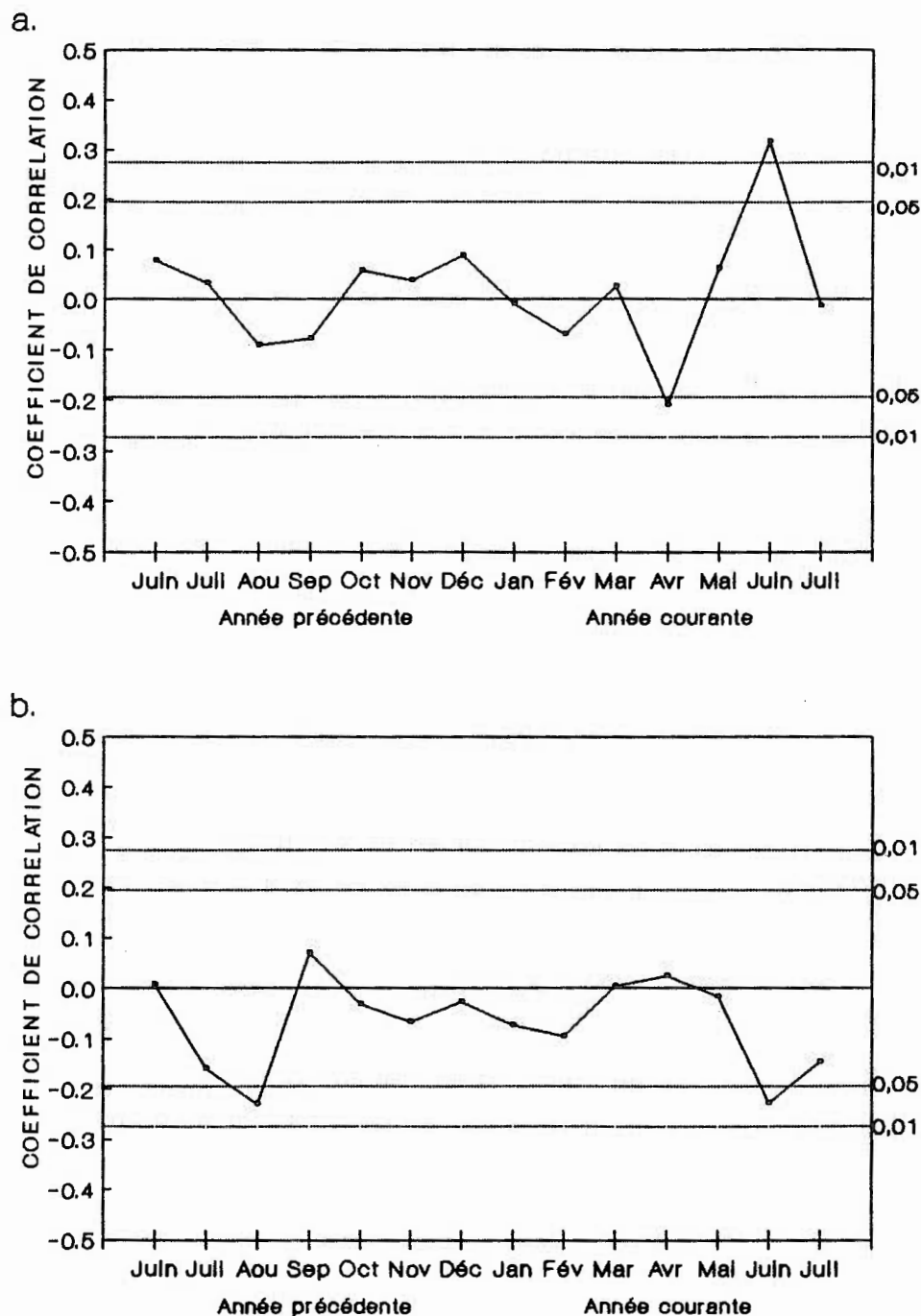


Figure 1.9 Fonction de corrélation pour la chronologie résiduelle (a. précipitation, b. température). Les lignes pointillées représentent les limites de signification à $p < 0,05$ et $p < 0,01$.

Tableau 1.3. Résultats de l'analyse en composantes principales
des données météorologiques et coefficients de la
régression multiple.

=====

Composante principale	Valeur propre	Variance expliquée (%)	Produit cumulé val. prop.	Coefficient régression multiple
1 *	2,754	9,8	2,754	0,215
2	2,357	8,4	6,493	
3	2,006	7,2	13,026	
4	1,934	6,9	25,194	
5	1,710	6,1	43,085	
6 *	1,637	5,8	70,522	-1,430
7 *	1,476	5,3	104,087	0,187
8	1,392	5,0	144,880	
9	1,213	4,3	175,808	
10	1,192	4,3	209,540	
11 *	1,067	3,8	223,569	0,155
12	0,987	3,5	220,676	
13	0,942	3,4	207,914	
14	0,827	3,0	171,933	
15 *	0,795	2,8	136,750	-0,117
16	0,716	2,6	97,981	
17 *	0,683	2,4	66,889	0,176
18	0,638	2,3	42,672	
19	0,546	1,9	23,284	
20	0,510	1,8	11,878	
21	0,469	1,7	5,578	
22 *	0,409	1,5	2,281	-0,150
23	0,392	1,4	0,894	
24	0,369	1,3	0,330	
25	0,302	1,1	0,100	
26	0,259	0,9	0,026	
27	0,237	0,8	0,006	
28	0,178	0,6	0,001	

* : composantes principales retenues par la régression multiple.

giques. Cependant, les amplitudes de seulement 7 d'entre eux (Tableau 1.3) ont passé le test de F et ont pu entrer dans la régression pas à pas. Ces composantes principales représentent individuellement de 9,8 à 1,5% et collectivement 31,4% de la variance des données météorologiques. Le modèle obtenu explique 19,2% de la variance de la chronologie résiduelle. La fonction finale obtenue (Fig. 1.10) consiste en 28 coefficients décrivant la réponse de la chronologie à des écarts aux normales pour chacune des 28 variables climatiques, le coefficient n'étant significatif que si son intervalle de confiance ne coupe pas l'abscisse.

La fonction de réponse reproduit sensiblement l'allure de la fonction de corrélation et 5 de ses coefficients sont significatifs (2 pour la précipitation et 3 pour la température). Tout comme exprimé par la fonction de corrélation, les précipitations de juin ont un effet positif sur la largeur des cernes tandis que l'effet des précipitations d'avril est inverse. Au niveau de la température, l'effet est négatif pour les mois d'août de l'année précédente ainsi que février et juillet de l'année courante. La température de juin courant montre un coefficient négatif, tout comme la fonction de corrélation, mais il n'est cependant pas significatif.

L'indice de sécheresse (IS) étant un indice quotidien, c'est la valeur maximale atteinte durant la période du 1^{er} mai au 15 juillet, saison de croissance approximative du cèdre blanc (Ahlgren 1957;

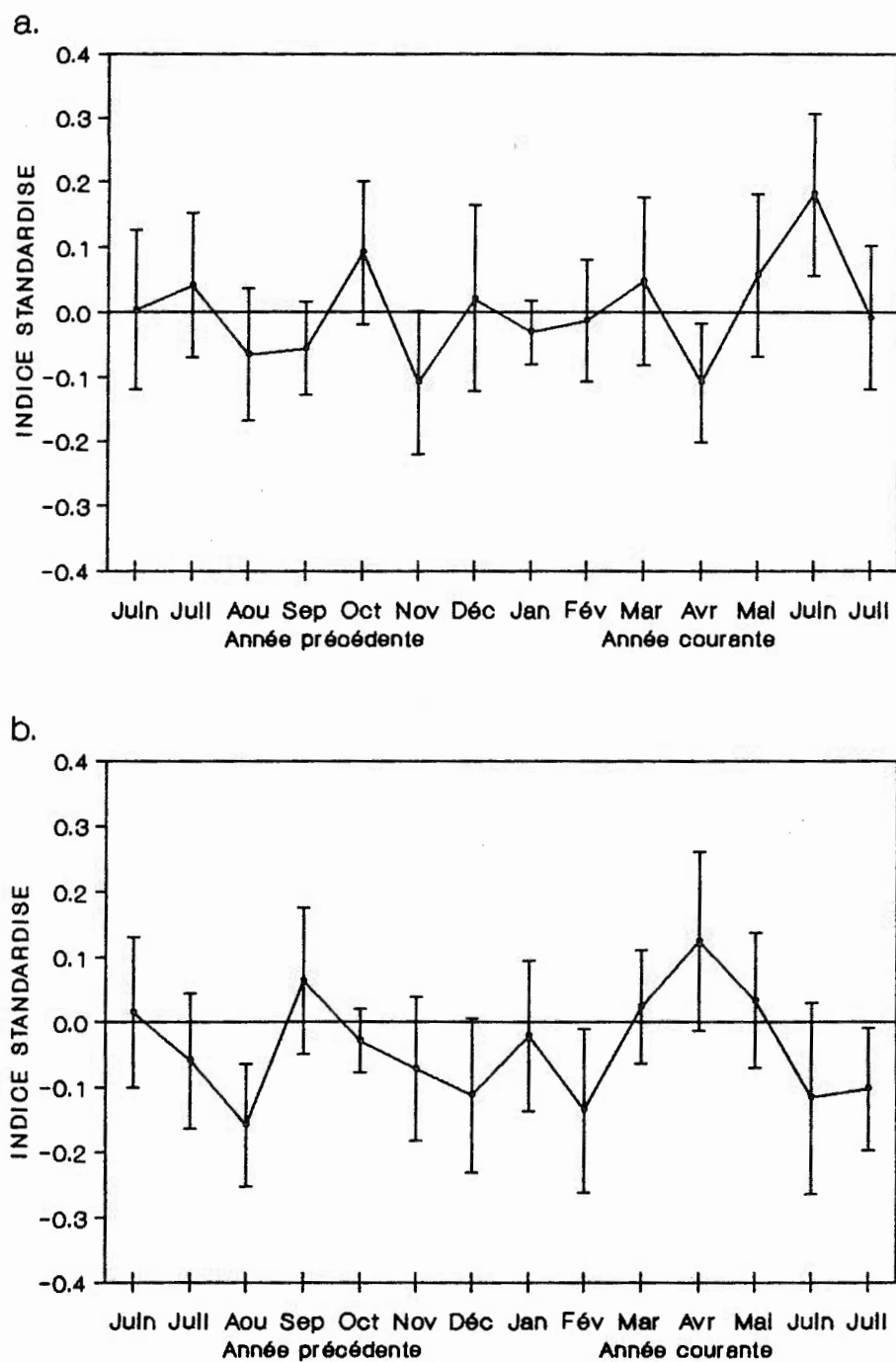


Figure 1.10 Fonction de réponse pour la chronologie résiduelle (a. précipitation, b. température). Les écarts représentent les limites de confiance à 95%.

Fraser 1962)), qui a été mise en relation avec la chronologie. L'IS est un indice qui, de par sa nature, intègre les conditions météorologiques sur une plus grande période que les autres composantes de l'Indice Forêt-Météo canadien: plusieurs journées de fortes pluies sont nécessaires pour le réduire à zéro tandis que sa constante d'assèchement exponentielle est de 52 jours (Turner 1972). L'IS a donc une grande inertie et sa valeur maximale peut être un bon indicateur des conditions de sécheresse ayant prévalu durant la saison de croissance. La corrélation entre la chronologie résiduelle et cette valeur maximale de l'IS est très bonne ($r=-0,42$ $p<0,001$), la figure 1.11 montrant bien la grande similitude entre les deux courbes. Il est à noter que l'échelle de l'Indice de Sécheresse est inversée de façon à ce que les périodes sèches (indice élevé) correspondent aux valeurs faibles de la chronologie.

5. Discussion

Plusieurs compilations (Cropper et Fritts 1981; Cook 1982; Jacoby 1982) montrent l'extrême rareté de chronologies nord-américaines ayant plus de 400 ans. Dans l'est du continent, seules quelques chronologies produites avec Taxodium distichum (L.) Rich. dans les plaines côtières du sud-est arrivent à dépasser 1000 ans (jusqu'à 1614 ans) (Stahle et al. 1988). Plus au nord, au Missouri, une chronologie de 622 ans a pu être développée avec Juniperus virginiana L. (Guyette et al. 1982). Au Québec, seulement deux

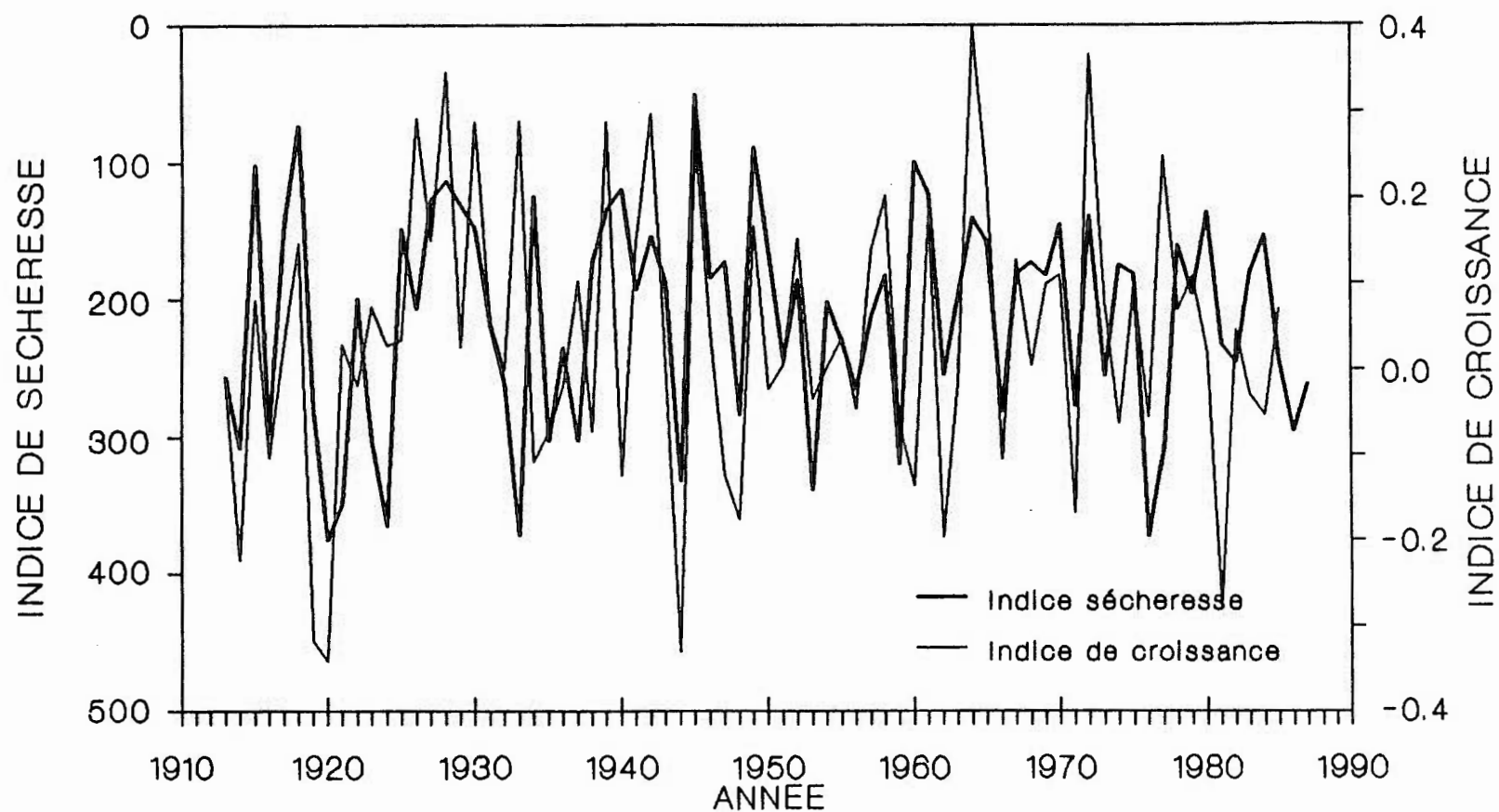


Figure 1.11 Comparaison entre la chronologie résiduelle et la valeur maximale de l'Indice de Sécheresse (1er mai au 15 juillet).

chronologies dépassaient 500 ans: 588 ans pour Picea mariana au Québec subarctique (Payette et al. 1985) et 578 ans pour Thuja occidentalis en Gaspésie (Cook, comm. pers. 1986). La réalisation d'une chronologie de 802 ans au lac Duparquet est donc unique, autant par sa longueur que par la qualité de sa réplique. En effet, jusqu'à 10 spécimens en font partie dès l'an 1291.

La variance commune (33,6%) de même que l'analyse de corrélation croisée démontrent clairement l'existence d'un signal commun dans la chronologie. Dans les sites de l'est de l'Amérique du Nord, la variance commune n'est généralement que d'environ 28,9% (Dewitt et Ames 1978). Les nombreux cernes caractéristiques, larges ou étroits, que l'on peut retrouver systématiquement d'un rayon à l'autre sont une autre confirmation de ce signal commun. Finalement, la grande similitude observée entre les deux chronologies distantes de 14 km (Fig. 1.7) est une démonstration concluante de la nature climatique du signal enregistré dans la chronologie.

Les valeurs de sensibilité, d'autocorrélation et d'écart type sont cependant loin des moyennes observées sur les sites semi-arides de l'ouest américain (Fritts et Shatz 1975), moyennes qui sont souvent regardées comme un idéal à atteindre. On parvient en effet à construire, dans ces régions, des chronologies avec une forte variabilité de haute fréquence et qui correspondent très bien aux fluctuations climatiques annuelles (LaMarche 1974). Il semble que la

nature même des espèces utilisées (Pinus aristata Engelm. et Pinus longaeva Bailey) y soit pour quelque chose, tout comme l'intensité et la simplicité du stress climatique présent. Au lac Duparquet, les paramètres observés se comparent toutefois aux moyennes retrouvées dans de nombreux sites de l'arctique ou de l'est de l'Amérique du Nord (Cropper et Fritts 1981). Des chercheurs (Brubaker et Garfinkel 1982; Cook 1982; Cropper 1982; LaMarche 1982) remettent en question les critères extrêmement sévères établis dans le sud-ouest américain et d'excellents travaux dendroclimatiques ont pu être réalisés dans le nord et l'est de l'Amérique avec des espèces à faible sensibilité et forte autocorrélation.

Les analyses climatiques comme les fonctions de corrélation et de réponse ne permettent évidemment pas de prouver hors de tout doute des relations de cause à effet entre le climat et la croissance radiale. Cependant, elles peuvent être un outil très utile pour tenter de comprendre les mécanismes d'action du climat sur la croissance. D'après les figures 1.9 et 1.10, les précipitations de juin semblent avoir une influence positive sur la croissance tandis que les températures de juin (fonction de corrélation) et juillet (fonction de réponse) ne doivent pas être trop élevées. Ceci indique bien l'importance du stress hydrique sur des sites aussi rocheux, les précipitations devant être suffisantes et accompagnées d'une température fraîche pour réduire l'évapo-

ration. Il est toutefois possible que les températures fraîches soient plutôt reliées à l'abondance de précipitations et n'aient pas elles-mêmes d'effet sur la croissance. Le stress subi par ces arbres se traduit par une très faible croissance radiale (0,36 mm/an), une largeur qui est plus de trois fois moins élevée (Test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,001$) que celle retrouvée chez des cèdres blancs croissant dans la même région en milieu mésique (1,12 mm/an) (Archambault 1986). L'étroite relation entre la chronologie et l'indice de sécheresse (Fig. 1.11) est une autre indication de l'importance de l'approvisionnement en eau pour ces arbres. Le faible rôle du mois de juillet est sans doute dû à la période de croissance radiale souvent très courte chez le cèdre blanc. Dans bien des cas elle est terminée aussi tôt que la fin de juin ou le début de juillet (Bannan 1955; Ahlgren 1957; Fraser 1962). Ce type d'influence positive de la précipitation et négative de la température durant la saison de croissance a déjà été observée pour plusieurs espèces dans l'est de l'Amérique du Nord: Juniperus virginiana (Guyette et al. 1982), Quercus alba L. (Guyette et al. 1982; Blasing et al. 1984), Tsuga canadensis (L.) Carr. ou Pinus strobus L. (Cook et Jacoby 1977).

L'importance de l'approvisionnement en eau lors de la formation du cerne annuel de croissance a effectivement été démontrée par plusieurs travaux (Buell et al. 1961; Fraser 1962; Glerum 1970;

Eunshik et Siccama 1987). Il a été suggéré que l'apparition des cellules plus lignifiées du bois final puisse être causée par une diminution de l'auxine disponible, réduction due au ralentissement de la croissance apicale (Larson 1963). Tout stress hydrique supplémentaire, tel une sécheresse durant la période de croissance, pourrait donc réduire la croissance apicale et, par le biais de l'auxine, contrôler la croissance radiale.

Il peut sembler surprenant de ne pas retrouver d'effet plus marqué de la température, le climat de l'Abitibi étant plutôt frais, avec une moyenne de seulement 64 jours consécutifs sans gel. Le cèdre blanc y est toutefois encore très loin de sa limite nord qui se trouve au sud de la Baie de James (Fowells 1965), à 300 km du lac Duparquet. La température est peut-être alors un facteur limitant moins important que ne l'est la précipitation sur les sites xériques. D'autres influences mineures se font aussi sentir: par exemple, l'effet négatif des précipitations d'avril se produit à une période où les sols sont saturés en eau. Il n'y a pas alors vraiment de déficit hydrique et les précipitations (pluie ou neige) ont peut-être pour conséquence de retarder la croissance en réduisant l'ensoleillement. L'influence négative de la température de février (fonction de réponse) peut être due au stress provoqué par un dégel hivernal, situation qui peut provoquer des dommages importants aux bourgeons (Fritts 1976). Finalement, l'effet négatif

d'une température chaude à la fin de l'été précédent est difficilement explicable. En effet, l'arbre est alors dans une période de stockage de réserves (Fritts 1976) et une température élevée devrait plutôt le favoriser en allongeant la période propice au stockage. D'autre part, une température chaude pourrait être néfaste en retardant l'entrée en dormance.

Il faut être prudent dans l'interprétation finale que l'on peut faire à partir de la fonction de réponse puisque le modèle obtenu n'explique finalement que 19,2% de la variance de la chronologie. Cependant, le modèle peut quand même nous servir de guide général pour l'interprétation des changements à long terme observés dans la chronologie (Fig. 1.6). Ainsi, l'augmentation graduelle de largeur observée depuis le milieu du XIXe siècle peut être associée à un accroissement général de la pluviosité estivale. Depuis une centaine d'années, avec la fin du Petit Age Glaciaire, il y aurait eu un changement important dans le patron de circulation atmosphérique avec une remontée du front polaire vers des régions plus nordiques (Lamb 1982). Cette remontée du front polaire serait accompagnée, sous nos latitudes, d'une intensification du flux des vents d'ouest en haute atmosphère (Lamb 1974). En surface on observerait, dans l'est de l'Amérique du Nord, une plus grande influence des masses d'air maritimes tropicales provenant de l'Atlantique ouest ou du Golfe du Mexique, ce qui implique une intensification des vents

méridionaux plus chauds et plus humides (Oliver et Hidore 1984). La période de 1550 à 1850 aurait, quant à elle, été dominée par les masses d'air continentales polaires caractérisées par une plus grande fréquence de vents du nord froids et secs (Lamb 1982).

La période 1440-1500 montre une chute dramatique des largeurs, chute qui est significative puisque la chronologie comporte alors plus d'une vingtaine de spécimens. Cette période de très faible croissance se retrouve aussi dans les deux autres très longues chronologies au Québec (Payette et al. 1985; Cook, comm. pers. 1986) et deux autres en Californie (LaMarche 1974; Scuderi 1987). Cette période a été effectivement décrite par Lamb (1982) comme étant froide et extrêmement stressante climatiquement; il la relie à l'absence quasi complète de taches solaires (Minimum de Spörer) entre 1400 et 1510.

Une autre période particulièrement difficile précède l'an 1300, zone qui comporte déjà de 5 à 10 spécimens. D'après Lamb (1982), un changement brusque s'est opéré en Amérique du Nord vers 1200 alors que les conditions très clémentes sont soudain devenues extrêmement sèches. Ces conditions de sécheresse furent particulièrement intenses dans l'ouest américain mais elles se firent sentir jusqu'en Iowa, au Wisconsin et au Minnesota où de nombreuses peuplades indiennes ont été complètement anéanties. Stahle et al. (1988), grâce à une reconstruction dendroclimatique des conditions de

sécheresse en Caroline du Nord, observent aussi cette période de sécheresse prolongée. Bryson et Murray (1977) émettent l'hypothèse qu'un refroidissement de l'arctique à partir de 1150 aurait amené, en été, une plus grande pénétration des masses d'air du Pacifique au dépend de celles en provenance du Golfe du Mexique. L'effet orographique asséchant des Rocheuses aurait pu, d'après ces auteurs, se faire sentir jusqu'aux Grands Lacs et jusqu'en Nouvelle-Angleterre. Il semble que l'ouest du Québec ait aussi subi les contrecoups de cette période climatiquement difficile et les cèdres blancs du lac Duparquet en montrent les effets.

6. Bibliographie

- Ahlgren, C.E. 1957. Phenological observations of nineteen tree species in northeastern Minnesota. *Ecology* 38: 622-628.
- Allen, A.K. 1986. Comm. pers. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona, Tucson, Arizona, 85721.
- Anonyme. 1982. Normales climatiques au Canada. Vol. 2: Températures, 306 pages. Vol. 3: Précipitations, 602 pages. Vol. 6: Gel, 276 pages. Environnement Canada. Ottawa.
- Archambault, S. 1986. Etude dendrochronologique sur Thuja occidentalis L., Lac Duparquet, Abitibi (Qué.). Rapport non publié (Initiation à la recherche). Dept. Sc. Bio. UQAM. 18 pages.
- Baillie, M.G.L. et Pilcher, J.R. 1973. A simple crossdating program for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 33: 7-14.
- Bannan, M.W. 1955. The vascular cambium and radial growth in Thuja occidentalis L. *Canadian Journal of Botany* 33: 113-138.
- Bergeron, Y. et Dubuc, M. 1989. Succession in the southern part of the Canadian boreal forest. *Vegetatio* 79: 51-63.
- Bergeron, Y. et Gagnon, D. 1987. Age structure of red pine (Pinus resinosa Ait.) at its northern limit in Quebec. *Canadian Journal of Forest Research* 17: 129-137.
- Blasing, T.J. et Duvick, D. 1984. Reconstruction of precipitation history in North American corn belt using tree rings. *Nature* 307: 143-145.
- Blasing, T.V., Solomon, A.S. et Duvick, D.N. 1984. Response function revisited. *Tree-Ring Bulletin* 44: 1-17.
- Box, G.E.P. et Jenkins, G.M. 1976. Time series analysis: forecasting and control. Holden Day. San Francisco. 575 pages.
- Brubaker, L.B. et Garfinkel, H. 1982. Comment. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.114-116. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.
- Bryson, R.A. et Murray, T.J. 1977. Climates of hunger. University of Wisconsin Press. Madison. 171 pages.

- Buell, M.F., Buell, H.F., Small, J.A. et Monk, C.D. 1961. Drought effect on radial growth of trees in the William L. Hutcheson Memorial Forest. Bulletin of the Torrey Botanical Club 88: 176-187.
- Commission Canadienne de Pédologie. 1978. Le système canadien de classification des sols. Publ. 1646. Ministère de l'Agriculture du Canada. Ottawa. 170 pages.
- Conkey, L.E. 1986. Red spruce tree-ring widths and densities in eastern North America as indicators of past climate. Quaternary Research 26: 232-243.
- Cook, E.R. 1982. Eastern North America. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.126-133. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.
- Cook, E.R. 1985. A time series analysis approach to tree ring standardization. Ph. D. thesis. University of Arizona. Tucson. 171 pages.
- Cook, E.R. 1986. Comm. pers. Lomont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, Palisades, N.Y. 10964.
- Cook, E.R. et Jacoby, G.C. Jr. 1977. Tree-ring-drought relationships in the Hudson Valley, New York. Science 198: 399-401.
- Cropper, J.P. et Fritts, H.C. 1981. Tree-ring width chronologies from the North American arctic. Arctic and Alpine Research 13: 245-260.
- Cropper, J.P. 1982. Climate reconstructions (1801 to 1938) inferred from tree-ring width chronologies of the North American Arctic. Arctic and Alpine Research 14: 223-241.
- Dermine, P. 1965. Climat de la saison de végétation dans l'enclave argileuse (Ouest du Québec et nord de l'Ontario). Publ. 1234. Ministère de l'Agriculture du Canada. Ottawa. 10 pages.
- DeWitt, E. et Ames, M. 1978. Tree-ring chronologies of eastern North America. University of Arizona. Laboratory of Tree-Ring Research, Chronology Series IV, Vol.I. 42 pages.
- Diotte, M. et Bergeron, Y. 1989. Fire and the distribution of Juniperus communis in the boreal forest of Québec, Canada. Journal of Biogeography 16: 91-96.

- Douglass, A.E. 1941. Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry* 39: 825-831.
- Eunshik, K. et Siccama, T.G. 1987. The influence of temperature and soil moisture on the radial growth of northern hardwood tree species at Hubbard Brook Experimental Forest, New Hampshire, U.S.A. Dans "Proceedings of the international symposium on ecological aspects of tree-ring analysis". Jacoby, G.C.Jr. et Hornbeck J.W. (Eds.), pp.26-37. U.S. Dept of Energy. Wash D.C. 726 pages.
- Fowells, H.A. 1965. Silvics of forest trees of the United States. USDA. Forest Service Handbook No. 271.
- Fraser, D.A. 1962. Tree growth in relation to soil moisture. Dans "Tree growth". T.T. Kozlowski (Ed.), pp.183-204. Ronald Press. New York. 442 pages.
- Fritts, H.C. 1963. Computer programs for tree-ring research. *Tree-Ring Bulletin* 25: 2-7.
- Fritts, H.C. 1966. Growth-rings of trees: their correlation with climate. *Science* 154: 973-979.
- Fritts, H.C. 1976. Tree-rings and climate. Academic Press. New York. 567 pages.
- Fritts, H.C. 1986. Principles and practices of dendroecology. Dans "Proceedings of the international symposium on ecological aspects of tree-ring analysis". Jacoby, G.C.Jr. et Hornbeck J.W. (Eds.), pp.6-15. U.S. Dept of Energy. Wash D.C. 726 pages.
- Fritts, H.C., Blasing, T.J., Hayden, B.P. et Kutzbach, J.E. 1971. Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology* 10: 845-864.
- Fritts, H.C. et Shatz, D.J. 1975. Selecting and characterizing tree-ring chronologies for dendroclimatic analysis. *Tree-Ring Bulletin* 35: 31-40.
- Glerum, C. 1970. Drought ring formation in conifers. *Forest Science* 16: 246-248.
- Grandtner, M.M. 1966. La végétation forestière du Québec méridional. Presses de l'Université Laval. Québec. 216 pages.

- Graybill, D.A. 1982. Chronology development and analysis. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.21-30. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.
- Guiot, J., Berger, A.L. et Munaut, A.V. 1982. Response functions. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.38-45. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.
- Guyette, R., McGinnes, E.A. et Leduc, S. 1982. Climatic History in the Ozarks as reconstructed from the tree-rings of eastern redcedar and white oak. Proceedings of the cedar glade symposium. pp.80-111. Missouri Academy of Science. Occasional Paper 7.
- Hughes, M.K., Gray, B., Pilcher, J., Baillie, M. et Leggett, P. 1978. Climatic signals in British Isles chronologies. Nature 272: 605-606.
- Jacoby, G.C. Jr. 1982. The Arctic. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.107-114. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.
- Jacoby, G.C. Jr., Cook, E.R. et Ulan, L.D. 1985. Reconstructed summer degree days in central Alaska and northwestern Canada since 1524. Quaternary Research 23: 18-26.
- Kohler, M.A. 1949. On the use of double-mass analysis for testing the consistency of meteorological records and for making required adjustments. Bulletin of the American Meteorological Society 30: 188-189.
- LaMarche, V.C. Jr. 1974. Paleoclimatic inferences from long tree-ring records. Science 183: 1043-1048.
- LaMarche, V.C. Jr. 1978. Tree-ring evidence of past climatic variability. Nature 276: 334-338.
- LaMarche, V.C. Jr. 1982. Sampling strategies. Dans "Climate from tree rings", Hughes, M.K., Kelly, P.M., Pilcher J.R. et LaMarche, V.C. Jr. (éds.), pp.2-6. Cambridge Univ. Press. Cambridge. 223 pages.

- LaMarche, V.C. Jr. et Stockton, C.W. 1974. Chronologies from temperature sensitive bristlecone pines at upper timberline in western United States. *Tree-Ring Bulletin* 34: 21-45.
- Lamb, H.H. 1974. Reconstructing the climatic patterns of the historical past. *Endeavour* 33: 40-47.
- Lamb, H.H. 1982. *Climate, history and the modern world*. Methuen. New York. 387 pages.
- Larson, P.R. 1963. The indirect effect of drought on tracheid diameter in red pine. *Forest Science* 9: 52-62.
- Legendre, L. et Legendre, P. 1984. *Ecologie numérique. Tome 2: La structure des données écologiques*. Masson. Paris. 335 pages.
- McBride, J.R. 1983. Analysis of tree rings and fire scars to establish fire history. *Tree-Ring Bulletin* 43: 51-67.
- Monserud, R.A. 1986. Time series analyses of tree-ring chronologies. *Forest Science* 32: 349-372.
- Oliver, J.E. et Hidore, J.J. 1984. *Climatology*. Charles E. Merrill Publishing. Columbus. 381 pages.
- Payette, S., Fillion, L., Gauthier, L. et Boutin, Y. 1985. Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Quebec. *Nature* 315: 135-138.
- Phipps, R.L. 1982. Comments on interpretation of climatic information from tree rings, Eastern North America. *Tree-Ring Bulletin* 42: 11-22.
- Rowe, J.S. 1972. *Les régions forestières du Canada*. Ministère de l'Environnement. Service Canadien des Forêts. Publ. 1300F. Information Canada. Ottawa. 172 pages.
- Schulman, E. 1954. Longevity under adversity in conifers. *Science* 119: 396-399.
- Scuderi, L.A. 1987. Glacier variations in the Sierra Nevada, California, as related to a 1200-year tree-ring chronology. *Quaternary Research* 27: 220-231.
- Stahle, D.W., Cleaveland, M.K. et Hehr, J.G. 1988. North Carolina climate changes reconstructed from tree rings: A.D. 372 to 1985. *Science* 240: 1517-1519.

- Stokes, M.A. et Smiley, T.L. 1968. An Introduction to tree-ring dating. University of Chicago Press. Chicago. 73 pages.
- Turner, J.A. 1972. The Drought Code component of the Canadian Forest Fire Behavior System. Publ. 1316. Canadian Forestry Service. Ottawa. 14 pages.
- Van Wagner, C.E. 1987. Elaboration et structure de la méthode canadienne de l'Indice Forêt-Météo. Canadian Forestry Service. Ottawa. 34 pages.
- Walker, G.L. 1987. Ecology and population biology of Thuja occidentalis L. in its southern disjunct range. Ph. D. thesis. University of Tennessee, Knoxville. 160 pages.
- Yamaguchi, D.K. 1986. Interpretation of cross correlation between tree-ring series. Tree-Ring Bulletin 46: 47-54.

CHAPITRE II

DISTRIBUTION ET MORPHOLOGIE DES VIEUX CEDRES BLANCS (Thuja occidentalis L.) AU LAC DUPARQUET (ABITIBI, QUE.)

1. Introduction

La découverte de la longévité extraordinaire de Pinus longaeva Bailey en 1954 (Schulman 1958) a stimulé les dendrochronologistes à rechercher de vieux spécimens d'autres espèces dans le but d'étendre au maximum les chronologies vers le passé. Malgré le fait que quelques espèces aient le potentiel de devenir millénaires, particulièrement les conifères, l'immense majorité ne dépasse pas quelques centaines d'années (Kramer et Kozlowski 1979). De plus, on s'est rapidement aperçu que pour une même espèce, les plus vieux spécimens s'observaient souvent dans des sites extrêmement stressants, soit très arides (LaMarche 1969; Luckman et al. 1984; Pruden et al. 1987; Robertson et Jozsa 1988) ou soit très froids (Edwards et Dunwiddie 1985; Payette et al. 1985).

La longévité dépend donc des caractéristiques génétiques propres à chaque espèce mais aussi, dans une certaine mesure, du type d'environnement. Wagener (1954), Westing (1964) et Beasley et Klemmedson (1973) ont émis l'hypothèse que les sites xériques, en réduisant la croissance, amènent une augmentation des taux de lignine et de composés phénoliques dans le bois, ce qui lui confère une plus grande résistance à la pourriture. D'autres insistent plutôt sur la faible intensité des feux en milieu xérique due à l'espacement des arbres (Luckman et al. 1984; Pruden et al. 1987). L'environnement semble aussi induire une morphologie particulière caractérisée par une faible stature, un feuillage clairsemé, une forte mortalité apicale ainsi qu'une réduction cambiale conduisant à une croissance unilatérale prononcée (Schulman 1954). Cette croissance unilatérale amène l'arbre à produire une quantité annuelle de tissu non-photosynthétique (xylème, phloème, écorce, etc.) relativement constante contrairement à un arbre normal dont le cambium s'accroît d'année en année. Wright et Mooney (1965) ainsi que LaMarche (1969) y voient un avantage qui ne serait pas étranger à la plus grande longévité de ces arbres asymétriques. En effet, la croissance unilatérale permet à l'arbre de maintenir à un niveau favorable le rapport entre tissu photosynthétique (feuillage) et non-photosynthétique.

Exception faite de Taxodium distichum (L.) Rich. qui peut atteindre 1700 ans (Stahle et al. 1988), l'est de l'Amérique du Nord est particulièrement dépourvu d'arbres dépassant 400 ans (Fowells 1965). En forêt boréale, les fréquentes perturbations par le feu réduisent de beaucoup l'espérance de vie des arbres (Heinselman 1981). Toutefois, le cèdre blanc est une espèce qui semble avoir le potentiel de dépasser 500 ou 600 ans (Heinselman 1973; Wells et al. 1983; Cook, comm. pers. 1986). Au lac Duparquet (Abitibi, Qué.), des travaux préliminaires ont même révélé la présence d'un spécimen d'au moins 670 ans (Bergeron, comm. pers. 1985).

Le cèdre blanc a une distribution relativement restreinte dont la limite nord s'étend de l'île Anticosti jusqu'au sud-est du Manitoba en passant par le sud de la baie de James; au sud, son aire principale ne dépasse pas l'état de New York, bien que des populations isolées puissent se rencontrer, dans les Appalaches, jusqu'au Tennessee (Fowells 1965). C'est une espèce dont l'amplitude écologique est grande et qui croit aussi bien dans les milieux humides que secs, dans les sites ombragés que dans les sites découverts (Rousseau 1974). Ses exigences au niveau du type de roche-mère ne sont pas non plus très précises: bien que Fernald (1919) en parle comme d'une espèce nécessitant un substrat calcaire, de nombreux

auteurs le remarquent dans des conditions acides ou sur des substrats granitiques (Curtis 1946; Nelson 1951; Walker 1987).

En Abitibi, l'espèce ne semble jamais très abondante et s'observe surtout sur des dépôts organiques épais (humisols typiques) ou parfois sur des sols très minces sur roc (Bergeron et al. 1983). Carleton et Maycock (1978), dans une vaste étude sur les sites mésiques de l'Abitibi, ne l'observent que dans un très petit nombre de sites et jamais comme espèce dominante tandis que Bergeron et al. (1985) ne le mentionnent que pour quelques sites hydriques et eutrophes. De plus, l'espèce semble rare sur les affleurements rocheux entre les lacs Abitibi et Duparquet (Clayden et Bouchard 1983). Tous ces travaux ont cependant été effectués dans des écosystèmes terrestres et ce n'est finalement qu'en milieu lacustre (Bergeron et Dubuc 1989) que l'espèce devient abondante. Ces auteurs mentionnent son abondance autour du lac Duparquet et sur ses îles, autant sur roc, sur moraine que sur argile. Malgré une telle abondance dans divers types de milieux, des observations (Bergeron, comm. pers. 1985) indiquent que nombre de vieux individus proviennent d'affleurement rocheux en bordure de l'eau.

Les objectifs sont d'abord d'examiner la distribution plutôt restreinte des vieux cèdres blancs au lac Duparquet afin de déterminer les facteurs abiotiques et historiques qui en sont responsables. L'accent est surtout mis sur l'influence des feux, la

perturbation majeure en forêt boréale. De plus, la morphologie particulière de ces vieux arbres en milieu xérique est étudiée en insistant sur le rôle de l'environnement et ses conséquences sur la longévité. Outre son effet sur la morphologie, le climat peut affecter la régénération récente. Celle-ci est donc étudiée, sur les sites xériques, et comparée à la chronologie du cèdre blanc développée dans le cadre du chapitre I, le but recherché étant de déceler une influence climatique.

2. Région étudiée

Le lac Duparquet (Fig. 2.1), un plan d'eau situé dans la partie ouest de l'Abitibi (48°28'N 79°17'W), a une superficie d'environ 50 km² et on peut y observer, en période d'étiage, près de 170 îles variant de quelques mètres² à 0,7 km² (Bergeron et Gagnon 1987). Plusieurs de ces îles sont assez escarpées, la plus forte dénivellation dépassant 50 m.

Ce lac fait partie de la ceinture d'argile abitibienne, une vaste région créée par les dépôts lacustres des lacs proglaciaires Barlow et Ojibway (Vincent et Hardy 1977). Les collines y sont recouvertes de dépôts morainiques remaniés ou érodés tandis qu'une couche d'argile recouvre les basses terres (Bergeron et al. 1983). Le socle rocheux est constitué d'intrusions de gneiss granitiques dans des formations volcano-sédimentaires d'âge archéen. Les roches

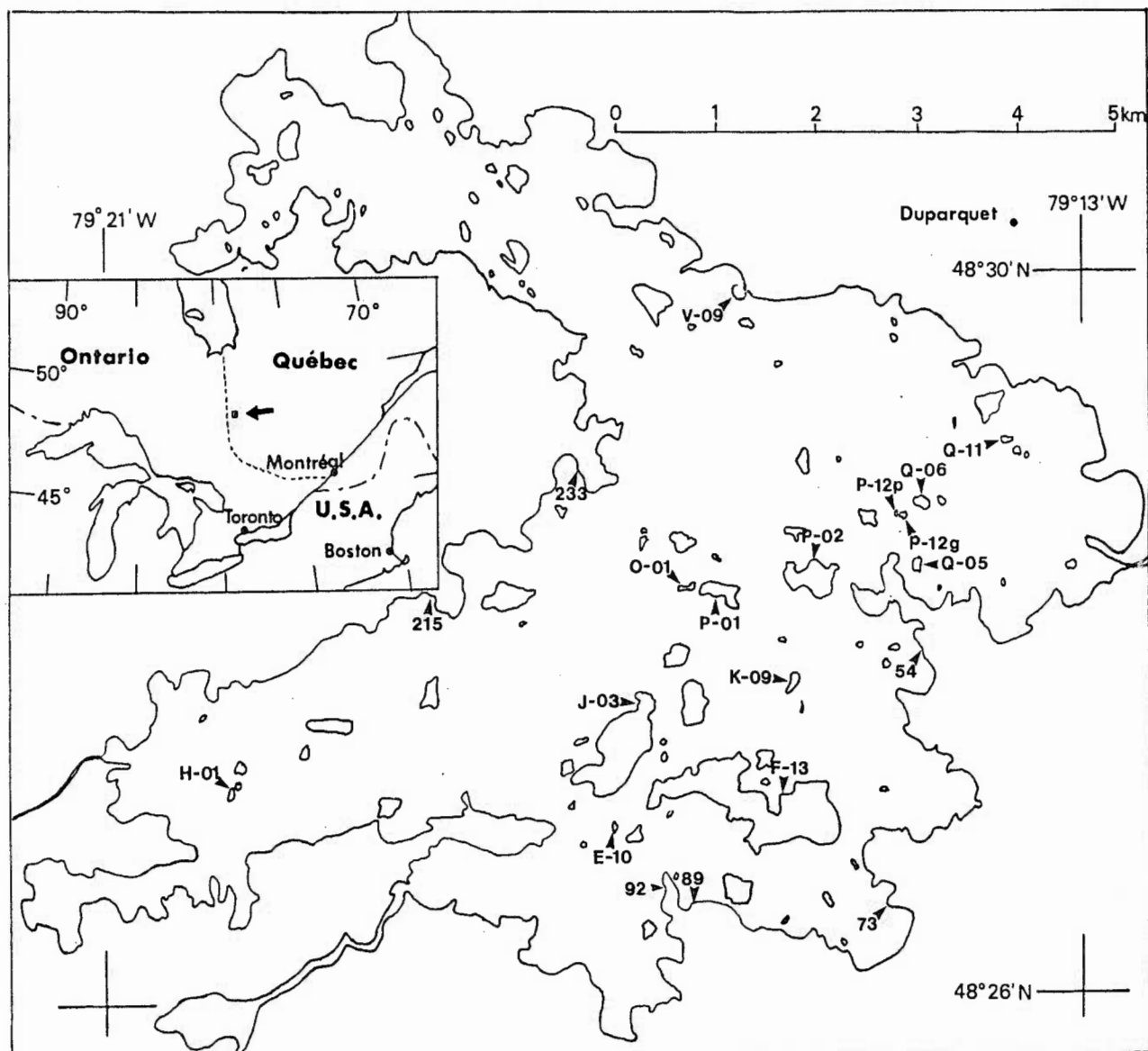


Figure 2.1 Localisation des 20 sites comportant des cèdres blancs d'âge estimé supérieur à 500 ans.

volcaniques sont de type keewatin (andésites, basaltes, rhyolites, tufs) tandis que les roches intrusives sont surtout des granites (diorites et gabbros) (Graham 1954).

La station météorologique la plus proche est située à LaSarre, 42 km au nord du lac Duparquet. Les moyennes annuelles de température et de précipitation totale sont de 0,6°C et de 822,7 mm avec une moyenne annuelle de 64 jours consécutifs sans gel (Anonyme 1982). La pluviométrie relativement faible est surtout concentrée durant la saison de croissance, 77,6% des précipitations annuelles étant sous forme de pluie.

La région se trouve à l'extrémité sud de la forêt boréale (Rowe 1972) et à l'intérieur du domaine climacique de la sapinière à bouleau blanc (Grandtner 1966). Le pourtour du lac comporte des forêts d'Abies balsamea (L.) Mill. et de Betula papyrifera Marsh. accompagnés de Picea glauca (Moench) Voss sur les sites mésiques. Les milieux eutrophes et hydriques sont dominés par Picea mariana (Mill.) BSP, Thuja occidentalis et Larix laricina (DuRoi) K. Koch tandis qu'on retrouve des forêts de Fraxinus nigra Marsh. et d'Ulmus americana L. dans les plaines de débordement (Bergeron et Gagnon 1987). Les îles et les berges sont présentement caractérisées par un cycle de feux d'environ 90 ans (Bergeron et Archambault, en prép.). Les forêts qui s'y installent après feu semblent éventuellement converger vers une dominance de Thuja occidentalis et de Picea

mariana sur les sites xériques ou d'Abies balsamea et de Thuja occidentalis sur les sites plus mésiques (Bergeron et Dubuc 1989).

3. Méthodologie

3.1 Longévité du cèdre blanc

Une recherche exhaustive a été effectuée sur l'ensemble des îles et des berges du lac Duparquet afin de recenser un maximum d'arbres très âgés. Sur les sites xériques (affleurements rocheux), les sondages ont porté sur tous les arbres de plus de 60 cm DHP (diamètre à hauteur de poitrine) ou présentant des caractéristiques d'âge avancé (réduction cambiale, mortalité apicale, petite stature ou tronc érodé) (Pruden et al. 1987). Sur les sites mésiques, platières ou plages, comme on ne retrouve pas ce type d'arbres difformes, seuls les individus de plus de 60 cm DHP ont été échantillonnés. De nombreux arbres ne répondant pas à ces critères ont quand même été sondés, dans les deux types de milieux, mais ils se sont tous avérés relativement jeunes.

Dans tous les cas où des arbres morts ont été échantillonnés, leurs cernes ont été interdatés (Douglass 1941) en les comparant avec la chronologie développée au chapitre I. Il est alors possible de dater l'année de formation de leur cernes externes et d'obtenir ainsi une date minimale pour la mort de l'arbre.

Lorsque le centre de l'arbre est pourri ou érodé, il importe d'estimer la longueur de carotte manquante pour mieux évaluer l'âge de l'arbre. Deux cas peuvent se présenter: s'il y a courbure dans les cernes, celle-ci indique assez bien la position du centre de l'arbre; lorsqu'aucune courbure n'est apparente, on soustrait la longueur de la carotte prélevée du rayon réel de l'arbre (DHP/2-épaisseur de l'écorce, environ 3 cm). Le nombre de cernes manquants est ensuite calculé en assimilant la croissance de l'arbre, au début de sa vie, à une exponentielle négative qui part de 1,5 mm (cerne interne) et qui rejoint asymptotiquement la croissance moyenne des 25 premières années de la carotte (Annexe E). L'exponentielle négative serait, d'après Fritts (1976), la fonction qui s'ajuste le mieux à la phase de croissance accélérée. Cette façon de procéder a l'avantage de ne pas surestimer l'âge de l'arbre, particulièrement si l'on ne dispose pas d'une carotte très longue.

3.2 Distribution des vieux cèdres blancs

Pour chacun des arbres dont l'âge est estimé à plus de 500 ans, les données abiotiques suivantes ont été notées: type de substrat, exposition, pente, distance entre l'arbre et la forêt ainsi qu'entre l'arbre et la rive (position en août). Ces deux dernières mesures ont permis de calculer une position relative $[(\text{Dist. arbre-forêt} / \text{dist. forêt-rive}) \times 100]$ pour chacun des arbres. Un historique des feux a aussi été réalisé sur chacun des sites. Ces

historiques, effectués d'après la méthode exposée par Heinselman (1973), comprenaient la recherche de cicatrices, de charbon de bois, ainsi que le prélèvement de carottes dans des arbres âgés susceptibles d'indiquer l'âge minimum du feu (i.e. Pinus banksiana Lamb., Betula papyrifera, Picea glauca, etc.).

Les sites mésiques sont répartis sur tout le pourtour du lac mais les sites xériques sont beaucoup moins abondants. Advenant une répartition non uniforme des cèdres blancs sur sites xériques, il était important de pouvoir la comparer avec la distribution des sites potentiels. Un inventaire exhaustif des sites potentiels a donc été fait autant sur les îles que sur les berges. Tous les sites potentiels observés (tout site ouvert sur roc en bordure du lac) ont d'abord été portés sur une carte à l'échelle 1:20,000. Chaque parcelle de 20 m (1 mm sur la carte) constituait par la suite "1 site potentiel" et son orientation fut évaluée en classes de 22,5°.

3.3 Morphologie des vieux cèdres blancs sur sites xériques

Diverses caractéristiques morphologiques ont été notées chez les vieux cèdres blancs (âge estimé supérieur à 500 ans) sur sites xériques: hauteur, circonférence, type de cime (cime originale, branches ayant pris la fonction de cime, etc.), présence et nombre approximatif de cônes. Ce nombre de cônes a été estimé à partir du nombre de grappes, un sous-échantillonnage de 200 grappes comptant

une moyenne de 8,3 cônes/grappe avec un écart type de 6,5. La portion de la circonférence encore recouverte d'écorce a été mesurée tandis que l'orientation de cette partie a été notée. Un indice de cambium vivant [Live Bark Index de Beasley et Klemmedson (1980)] a été calculé en faisant le rapport entre la portion d'écorce résiduelle (représentant approximativement la zone de cambium vivant) et la circonférence totale si l'arbre avait eu une croissance circulaire normale. Une estimation du volume de feuillage présent a été effectuée en assimilant le houppier à un cône, en mesurant ses dimensions et en évaluant quel pourcentage était effectivement occupé par le feuillage.

Afin de déterminer la relation entre la surface photosynthétique et la surface d'aubier (surface non-photosynthétique), l'ensemble du feuillage et une section de tronc ont été prélevés chez 13 arbres dont l'âge variait de 5 à 756 ans. Après séchage, le feuillage de chaque arbre a été pesé et son poids sec converti en surface foliaire grâce à un facteur de conversion. C'est à partir d'un sous-échantillon de 50 rameaux dont le feuillage complet a été mesuré au planimètre, puis séché et pesé que ce facteur de conversion a été calculé. D'autre part, la surface d'aubier a été tracée sur acétate pour être ensuite mesurée au planimètre.

3.4 Régénération sur sites xériques

Une structure d'âge a été confectionnée pour la période 1887-1986 dans le but d'examiner les variations de recrutement ayant pu survenir depuis un siècle. Comme les arbres plus âgés sont la plupart du temps très érodés à la base, la structure d'âge a été limitée aux cent dernières années. Sur chacun des sites xériques où des arbres très âgés ont été répertoriés, une carotte ou une section de tige ont donc été prélevées, le plus bas possible, sur les 10 individus les plus rapprochés ayant moins de 5 cm de diamètre au sol et provenant de reproduction sexuée. Les individus issus de reproduction végétative [i.e. ceux montrant un lien avec une branche d'un autre individu ou ayant une tige fortement courbée à la base (Scott et Murphy 1987)] ont été exclus. Une structure d'âge (classes de 5 ans) a été confectionnée et les résidus après extraction de tendance ont été comparés à la chronologie standardisée (regressions polynomiales) développée au Chapitre I. La chronologie a été filtrée grâce à une moyenne mobile de 5 ans de façon à pouvoir être comparée à la structure d'âge.

4. Résultats

4.1 Longévité du cèdre blanc

La recherche intensive de vieux spécimens a révélé la présence de 43 arbres dont l'âge peut être estimé à plus de 500 ans (Tableau

2.1, Fig. 2.2a). Trente huit d'entre eux proviennent de sites xériques (roc nu ou sol très mince sur roc) et seulement 5 de sites mésiques (plages, platières, replats argileux). Ces 5 arbres ne dépassent pas 583 ans tandis que sur sites xériques 19 arbres ont des âges estimés supérieurs, le plus vieux atteignant même 908 ans.

La précision des estimations d'âge dépend du rapport entre la longueur de la carotte prélevée et la longueur du rayon de l'arbre. Les arbres sur sites mésiques ont des centres creux et le rapport varie entre 0,35 et 0,72 (Tableau 2.1). Cependant, les rapports mesurés sur sites xériques sont beaucoup plus élevés (Test de Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,0005$), 89,5% des spécimens ayant des rapports supérieurs à 0,80. Les estimations d'âge pour ce deuxième groupe d'arbres sont donc susceptibles d'être très près de la réalité. Il faut cependant mentionner que, dans les deux cas, aucune correction n'a été apportée pour tenir compte de la hauteur des prélèvements.

Il est possible d'observer, à la figure 2.2b, que les séries prélevées sur sites xériques sont effectivement plus longues. Trente d'entre elles comportent plus de 500 cernes, la plus longue étant une série de 869 cernes, alors qu'aucune carotte prélevée sur site mésique ne dépasse 500 ans. Le bois des arbres sur sites xériques semble donc doté d'une forte résistance à la pourriture. Ce phénomène est d'ailleurs bien démontré par la présence de 7

Tableau 2.1. Liste des arbres dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans

=====

Arbre No.	Sta. No.	Unité	Cerne externe	Cerne interne	Age minimum	Age estimé	Rapport carotte/rayon
--------------	-------------	-------	------------------	------------------	----------------	---------------	--------------------------

SITES XERIQUES

441	K-09	file	1987	1119	869	908	0,90
718	K-09	file	1987	1209	779	810	0,95
453	J-03	file	1987	1222	766	800	0,88
470	P-12g	file	1987	1232	756	756	1,00
465	K-09	file	1978	1234	745	745	1,00
904	K-09	file	1985	1249	737	737	1,00
404	J-03	file	1986	1291	696	721	0,94
473	O-01	file	1987	1278	710	717	0,98
434	54	berge	1987	1391	597	686	0,81
746	K-09	file	1856	1186	671	671	1,00
460	K-09	file	1920	1260	661	661	1,00
474	O-01	file	1987	1340	648	654	0,95
425	92	berge	1987	1390	598	654	0,84
730	J-03	file	1987	1481	507	639	0,68
454	V-09	file	1987	1374	614	629	0,95
439	K-09	file	1987	1376	612	617	0,98
416	233	berge	1987	1381	607	611	0,98
747	K-09	file	"599"	"1" *	600	603	0,98
428	89	berge	1987	1420	568	603	0,86
719	F-13	file	1987	1583	405	583	0,57
449	J-03	file	1987	1454	534	583	0,82
457	P-12p	file	1767	1233	535	581	0,83
712	P-01	file	1987	1538	450	579	0,71
472	K-09	file	1926	1354	573	579	0,97
440	K-09	file	1987	1473	515	553	0,89
419	H-01	file	1987	1456	532	546	0,98
461	K-09	file	1987	1451	537	543	0,98
403	J-03	file	1987	1450	538	543	0,97
402	J-03	file	1987	1445	543	543	1,00
405	P-02	file	1987	1565	423	540	0,61
467	E-10	file	1880	1366	515	534	0,93
725	Q-11	file	1867	1346	522	522	1,00
728	O-01	file	1894	1379	516	516	1,00
431	73	berge	1987	1507	481	511	0,90
452	E-10	file	1971	1502	470	510	0,84
408	P-12p	file	1987	1518	470	508	0,88
437	V-09	file	1987	1515	473	506	0,83
409	P-12p	file	1987	1522	466	505	0,81

SITES MESIQUES

710	89	berge	1987	1687	301	583	0,40
714	P-02	file	1987	1711	277	578	0,35
704	215	berge	1987	1550	438	560	0,72
716	Q-06	file	1987	1558	430	559	0,65
707	Q-05	file	1987	1557	431	518	0,69

* Specimen non daté

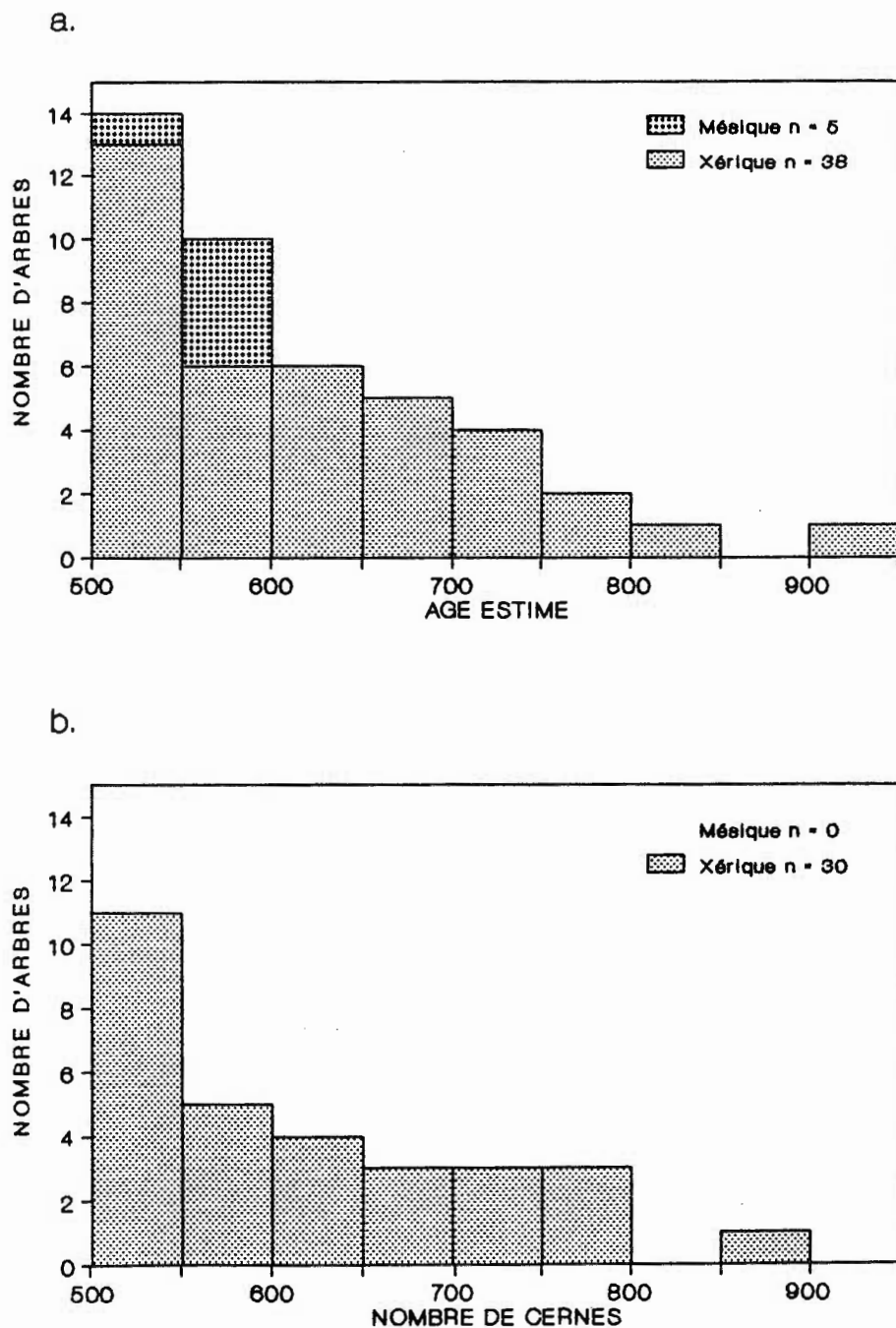


Figure 2.2 Structure d'âge a.) des cèdres blancs dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans, b.) des séries de plus de 500 cernes.

arbres déjà morts dont le cerne externe (i.e. celui qui a été formé peu avant la mort de l'arbre) est antérieur à 1930 (Tableau 2.1). Dans tous les cas, ces arbres morts montraient un bois très sec et pratiquement exempt de pourriture. De nombreux autres fragments, plus courts que 500 ans cependant, ont aussi été retrouvés et l'année de leur mort, déterminée par interdatation, remonte parfois à une période variant entre 200 et 500 ans.

4.2 Distribution des vieux cèdres blancs

La répartition des vieux spécimens entre les deux grandes unités de paysage (îles et berges) est assez semblable sur sites mésiques (Tableau 2.2) mais l'échantillonnage est beaucoup trop

Tableau 2.2. Répartition des spécimens de plus de 500 ans sur les îles et les berges du lac Duparquet.

=====

	Sites mésiques (n=5)	Sites xériques (n=38)
Iles	3	33
Berges	2	5
	N.S.	***

N.S. : Non significatif

*** : $p < 0,0001$

faible pour en tirer des conclusions. Cependant, sur sites xériques la disparité est étonnante: alors que les sites xériques sont assez bien répartis entre les îles et les berges (870 sites potentiels contre 812), on retrouve jusqu'à 33 vieux cèdres blancs sur les îles et seulement 5 sur les berges, une différence hautement significative ($X^2 = 18,78$ $p < 0,0001$).

En plus d'être regroupés en grande partie sur les îles du lac Duparquet, les vieux cèdres blancs ne sont pas répartis de façon homogène mais sont concentrés surtout sur quelques îles. Ainsi, l'île K-09 abrite 11 individus de plus de 500 ans tandis qu'une petite pointe au nord-ouest de l'île J-03 en compte 6 (Tableau 2.3, Fig. 2.1). Plus de la moitié des arbres de plus de 500 ans (53,5%) se trouvent donc confinés à 4 îles (K-09, J-03, P-12p et O-01). Ces îles, sauf pour l'île J-03 dont la pointe nord-ouest a brûlé en 1804 (Tableau 2.3), ont la particularité d'avoir échappé aux feux depuis au moins 300 ans.

Le tableau 2.3 indique la date des derniers feux connus de façon précise (cicatrices de feu) dans la zone à proximité des vieux arbres de même que l'épaisseur de matière organique recouvrant les premiers charbons rencontrés à ces endroits. On remarque une relation linéaire entre cette date et l'épaisseur de matière organique ($y = 1993 - 13,5x$ $r = 0,92$ $p < 0,0001$, fig. 2.3). Il est donc possible de mieux estimer la date des feux dans les cas où on ne

Tableau 2.3. Historiques de feu pour les sites comportant des arbres dont l'âge estimé est supérieur à 500 ans.

=====				
Site	Nb. arbres (500 ans +)	Superficie flés (ha)	Date du dernier feu	Charbon Profondeur (cm)
SITES XERIQUES				
<u>Iles</u>				
K-09	11	1,2	1683 min	26
J-03	6	36,4	<u>1804</u>	13
O-01	3	0,8	1580 min	31
P-12p	3	0,04	1233 min	13
V-09	2	1,7	<u>1868</u>	10
E-10	2	0,6	1889 min	9
F-13	1	70,5	<u>1946</u>	7
H-01	1	0,5	1865 min	7
P-01	1	4,9	<u>1821</u>	12
P-02	1	10,9	<u>1794</u>	12
P-12g	1	0,3	1829 min	42
Q-11	1	0,3	-	-
<u>Berges</u>				
54	1		<u>1832</u>	14
73	1		<u>1847</u>	12
89	1		<u>1887</u>	7
92	1		<u>1887</u>	7
233	1		<u>1846</u>	10
SITES MESIQUES				
<u>Iles</u>				
P-02	1	10,9	<u>1794</u>	12
Q-05	1	1,0	<u>1882</u>	-
Q-06	1	1,4	-	-
<u>Berges</u>				
89	1		<u>1887</u>	7
215	1		1846 min	-
(-) Données non disponibles				
<u>1804</u>	Date de feu précise (Cicatrices de feu)			
1683 min	Date de feu minimale (Évaluée par la présence d'une cohorte ou à partir de l'âge de l'arbre le plus vieux de la forêt)			

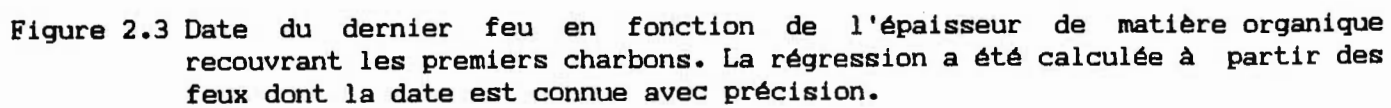


Figure 2.3 Date du dernier feu en fonction de l'épaisseur de matière organique recouvrant les premiers charbons. La régression a été calculée à partir des feux dont la date est connue avec précision.

dispose que d'une date minimale (cohorte ou plus vieil arbre à l'intérieur d'un site). Cependant, rien n'indique si, en extrapolant aussi loin vers le passé, la relation demeure linéaire. Le compactage de la matière organique ou son accumulation très lente peuvent faire en sorte que la date réelle d'un feu soit beaucoup plus ancienne que la profondeur observée ne l'indique. Par cette méthode, la date du feu sur l'île P-12g est donc estimée à 1426 (charbon à 45 cm de profondeur) alors que les arbres à l'intérieur de la forêt, en apparence très vieux mais toujours creux, n'ont montré, au maximum, qu'une série de 158 cernes. D'un autre côté, l'île P-12p a une superficie d'à peine 0,04 ha et la végétation y est très clairsemée; par conséquent, l'accumulation de matière organique pourrait y être très lente. Quatre arbres du XVI^e siècle ainsi qu'un autre né en 1233 croissent autour de l'île et ne montrent aucune trace de feu. Malgré la présence de charbon à seulement 13 cm, la naissance du plus vieil arbre pourrait, dans ce cas, être un meilleur indicateur de l'année du feu.

Dans l'ensemble des sites répertoriés, les vieux individus n'occupent qu'une mince bande comprise entre la marge de la forêt et la surface du lac (Tableau 2.4). Ils sont parfois accolés à la forêt ou un espace plus ou moins grand de roc nu les en sépare (jusqu'à 19,0 m, la moyenne étant de 4,1 m). A l'autre extrémité ils sont coincés par la présence du lac: un espace de roc de 1,5 à 11,0

m les sépare de l'eau, la moyenne étant de 5,0 m. Il est à remarquer que malgré une recherche intensive sur chacun des sites et sur de nombreux sites xériques situés loin de la surface du lac, il fut extrêmement rare de trouver un cèdre blanc de plus de 300 ans à l'intérieur de la forêt, le plus vieux recensé n'ayant que 408 ans (file O-01).

Tableau 2.4. Position des cèdres blancs de plus de 500 ans par rapport à la marge de la forêt et à la surface du lac.

=====

	Distance à la forêt (m)	Distance au lac en août (m)
Maximum	19,0	11,0
Minimum	0,0	1,5
Moyenne	4,1	5,0
Ecart type	5,3	2,6

Plusieurs des feux (66,6%) ont eu lieu depuis le début du XIXe siècle; ils sont donc assez récents, si on les compare à l'âge des vieux cèdres blancs en bordure du lac. On remarque cependant (Fig. 2.4) que dans la majorité des cas où le feu est récent, les arbres se trouvent à une distance relative de la forêt (i.e. rapport entre la distance de l'arbre à la forêt et celle séparant la forêt du lac)

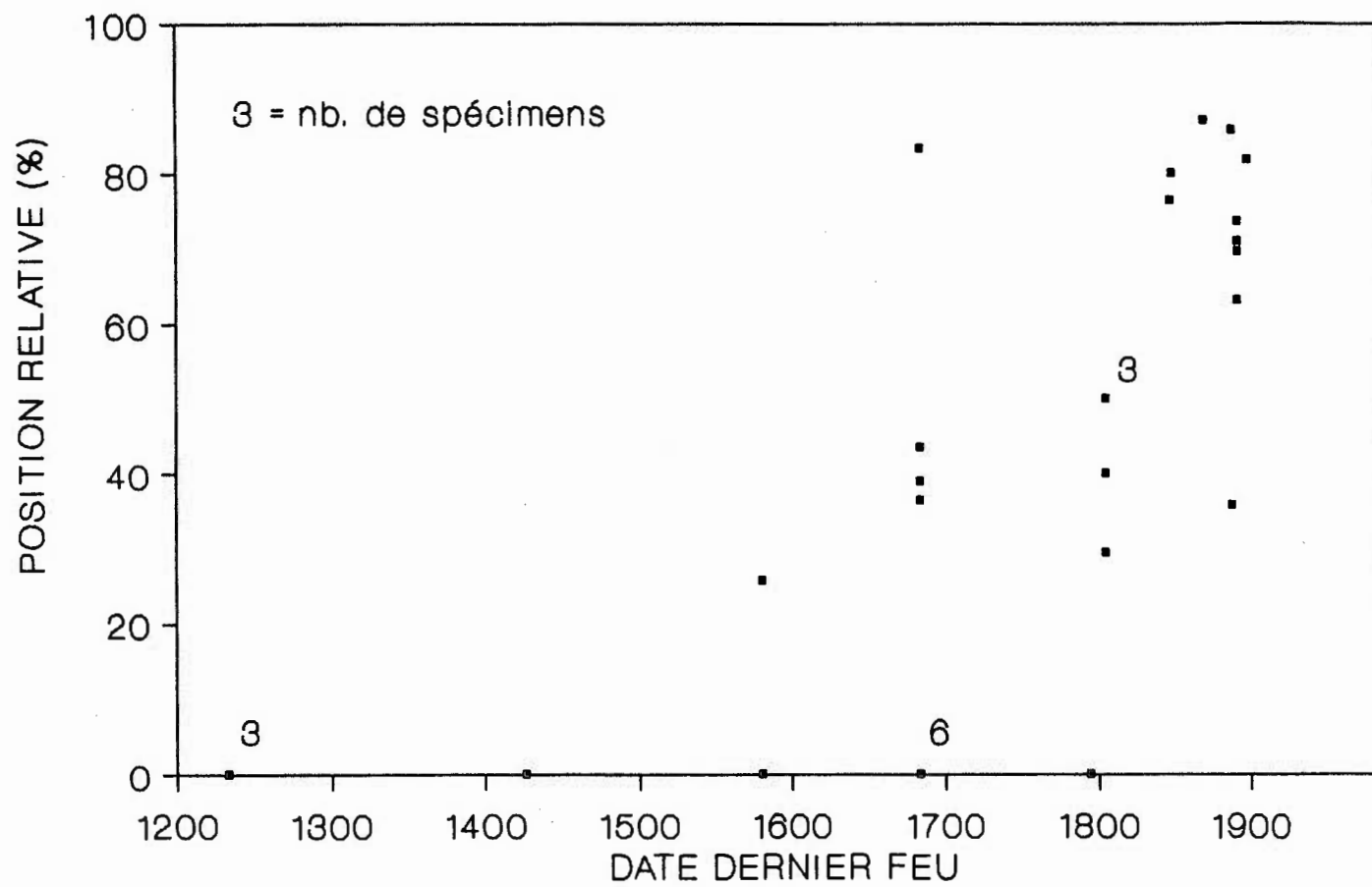


Figure 2.4 Position relative des arbres entre la forêt (0%) et le lac (100%) en fonction de la date du dernier feu.

supérieure à 30%. Sur les 4 sites où les feux semblent antérieurs à 1700, les arbres sont beaucoup plus rapprochés de la marge de la forêt (Test Wilcoxon-Mann-Whitney $p < 0,001$).

En plus de ne se trouver qu'à la marge de quelques îles et berges, les arbres de plus de 500 ans n'y occupent pas uniformément tout le pourtour. Ils s'observent plutôt uniquement à des expositions comprises entre le sud-sud-ouest, l'ouest et le nord-nord-est (Fig. 2.5a). L'orientation des sites xériques potentiels (Fig. 2.5b) est semblable sur les îles et sur les berges ($X^2=8.49$) mais il s'avère que l'orientation ouest (SSW à N) comporte effectivement plus de sites xériques potentiels que l'orientation est (NNE à S) selon un test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,04$). Ce résultat ne devrait toutefois pas faire perdre de vue que l'orientation est, tout en comportant 39,1% des sites potentiels, ne comporte qu'un seul arbre de plus de 500 ans.

La fréquence des vents et leur vitesse moyenne pour la période de mai à août sont présentées à la figure 2.6a,b. Ces données sont obtenues à partir de la moyenne de trois stations météorologiques: Rouyn (Qué.), Val D'Or (Qué.) et Earlington (Ont.) (Anonyme 1982). Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney ($p < 0,006$) révèle que les vents proviennent plus souvent de l'orientation ouest (61,5% du temps) que de l'orientation est (28,1%), les périodes de temps calme représentant 10,4% du temps. De plus, le même type de test démontre

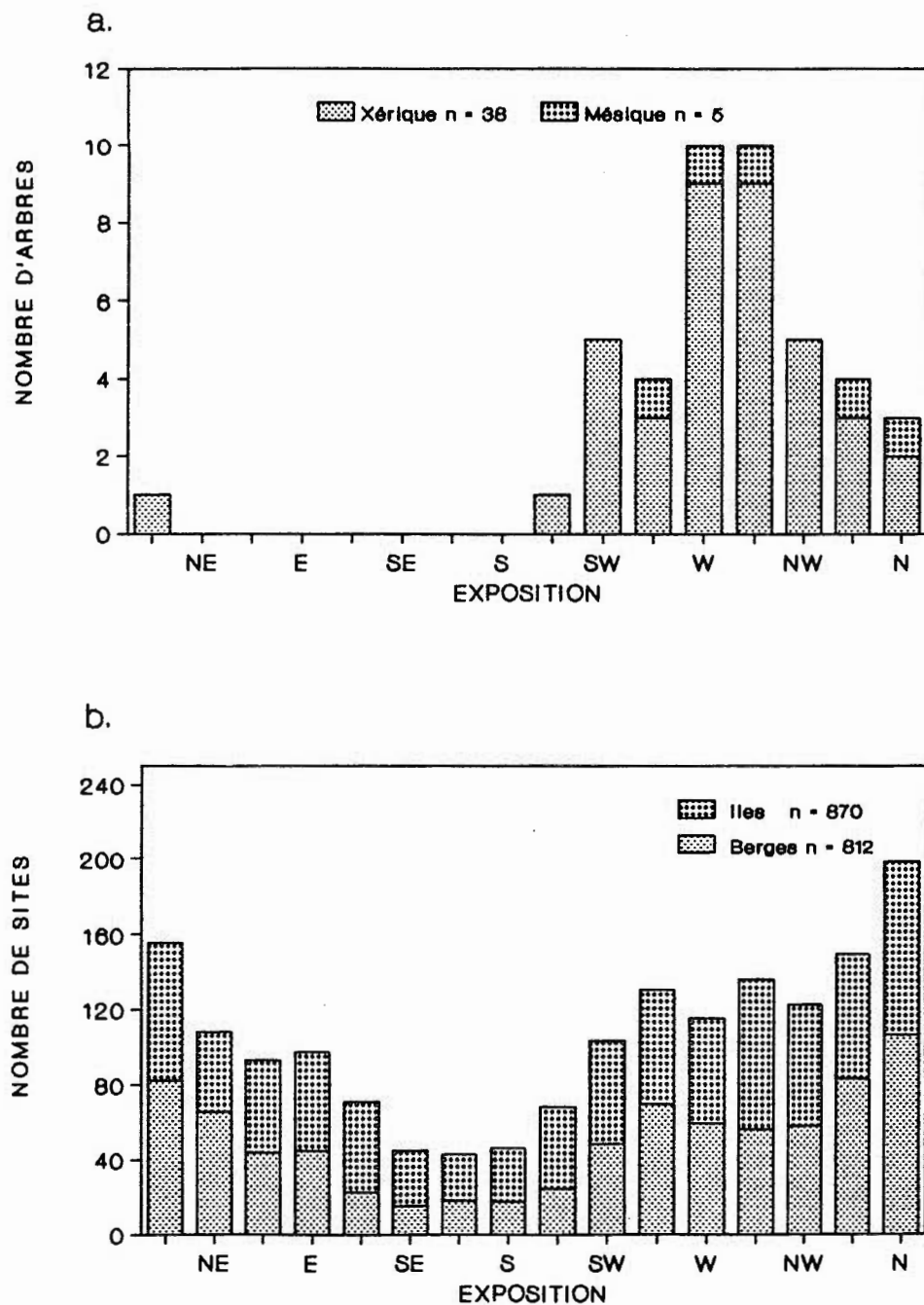


Figure 2.5 Distribution a.) des cèdres blancs (âge estimé supérieur à 500 ans) en fonction de l'exposition du site, b.) des sites xériques potentiels en fonction de l'exposition.

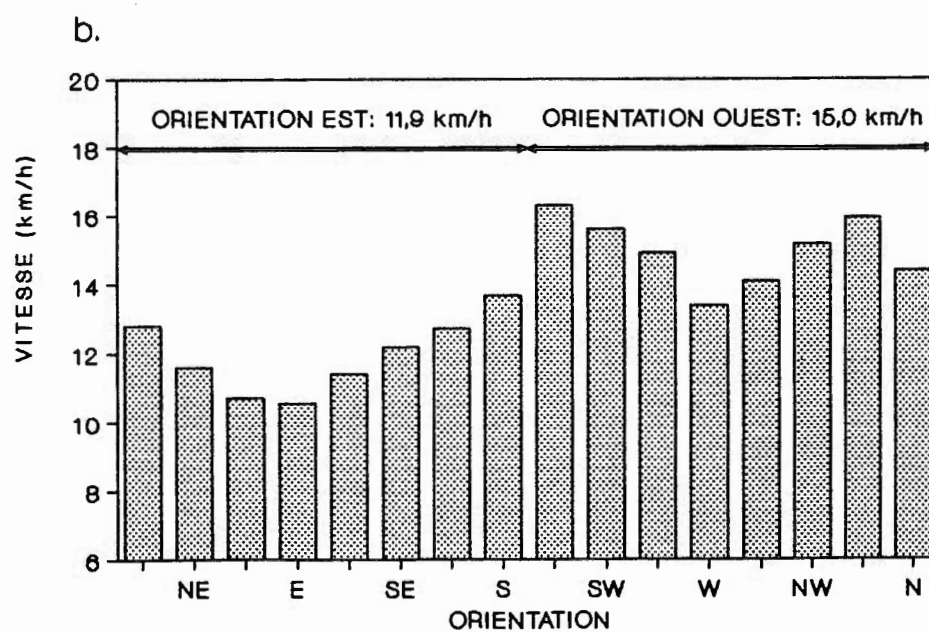
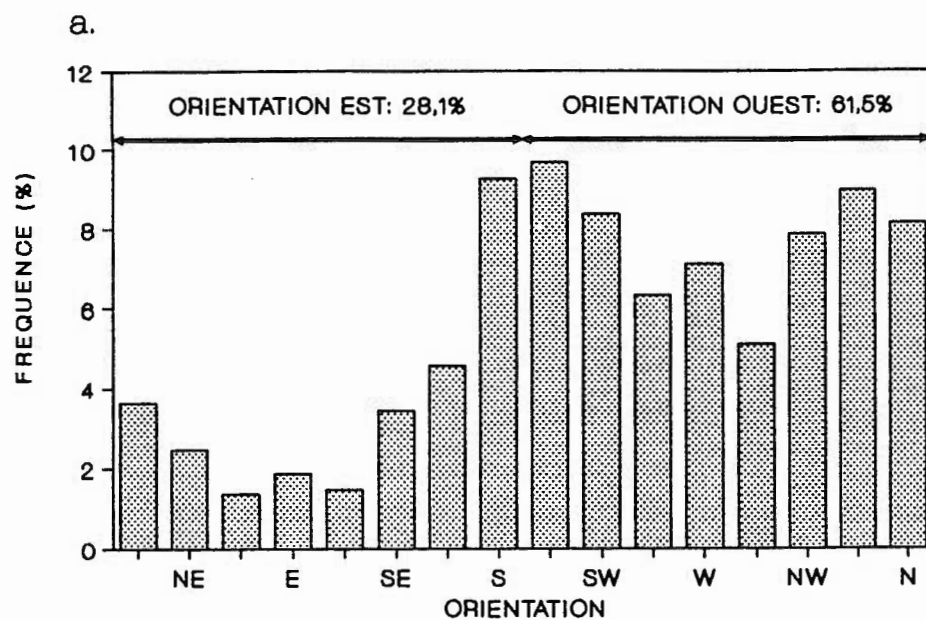


Figure 2.6 Distribution a.) de la direction des vents et b.) de la vitesse des vents pour la période de mai à août.

que les vents de l'orientation ouest sont plus forts (15,0 km/h) que ceux en provenance de l'orientation est (11,9 km/h) ($p < 0,001$). Les résultats sont très similaires pour l'ensemble de l'année (orientation ouest, 58,1% et 15,4 km/h; orientation est, 31,6% et 13,1 km/h). Les vieux spécimens semblent donc regroupés face aux vents les plus fréquents et les plus forts.

4.3 Morphologie des vieux cèdres blancs sur sites xériques

Les cèdres blancs de plus de 500 ans sur sites xériques sont caractérisés par une faible stature (Tableau 2.5). Malgré leur âge extrêmement avancé, ils ne mesurent qu'environ 4,6 m de hauteur avec

Tableau 2.5. Caractéristiques morphologiques des cèdres blancs de plus de 500 ans sur sites xériques.

=====				
	Moyenne	Ecart type	Extrêmes Min. Max.	
Hauteur totale (m)	4,6	2,3	1,8	10,0
Circonférence (cm)	102,0	49,9	42,0	238,0
Volume feuillage (m ³)	1,8	2,0	0,03	6,9
Cônes	538,2	874,8	17	3320
Indice Cambium Vivant (%)	20,5	25,4	0,8	100,0

une circonférence moyenne de 102,0 cm. Leur volume de feuillage (estimation visuelle) est lui aussi très faible avec une moyenne de 1,8 m³ et une valeur minimale de 0,03 m³. La production de graines se poursuit bien au delà de 800 ans, l'individu de 908 ans portant environ 141 cônes, mais elle n'est jamais très abondante. En effet, elle est en moyenne de 538,2 cônes avec une valeur minimale aussi faible que 17 cônes pour un arbre de 543 ans. En considérant qu'un cône contient généralement 4 graines (Hosie 1978), les vieux arbres sur sites xériques produisent en moyenne 2153 graines, ce qui est très inférieur aux 125000 graines que peut produire un arbre normal moyen (Nelson 1951).

En plus d'une faible stature, les arbres ont souvent un port tordu, difforme et ils présentent une forte mortalité apicale (Fig. 2.7). Parmi les 24 arbres sur lesquels ce type de données a pu être recueilli, 23 avaient une cime originale morte. Dans 22 cas, une ou plusieurs branches ont adopté une croissance verticale pour assumer par la suite la fonction de cime (cime secondaire). Parfois, cette cime secondaire est morte (12 fois) et une branche a alors formé une cime tertiaire. Il a même été possible d'observer un arbre avec 4 mortalité successive de la cime, la cinquième cime étant encore vivante.

Pratiquement tous les arbres de plus de 500 ans (92,1%) montraient un certain degré de mortalité cambiale radiale. Le

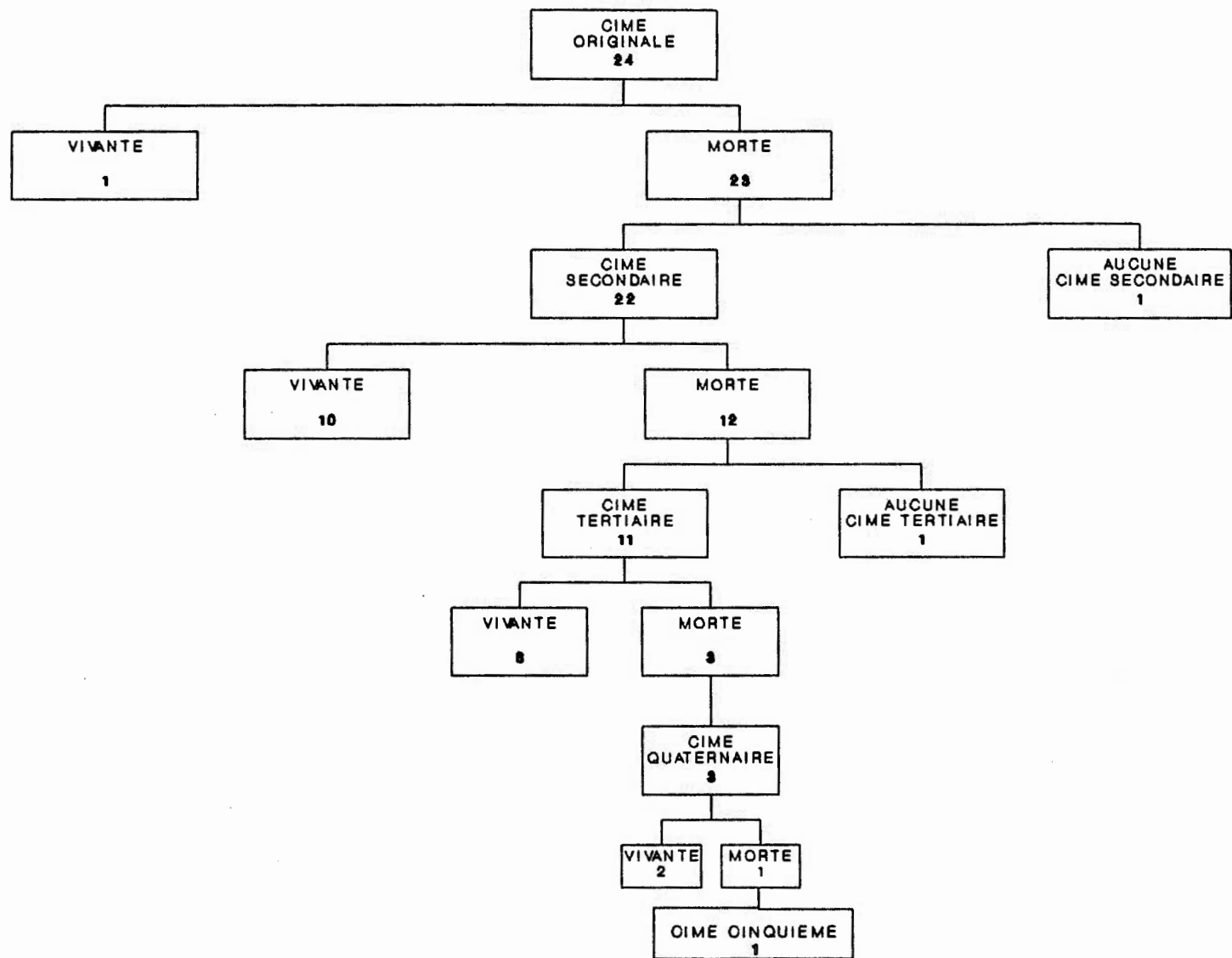


Figure 2.7 Evolution de la condition de la cime chez 24 arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.

cambium ne couvre alors plus toute la circonférence de l'arbre, le xylème est exposé et la croissance devient unilatérale. Certains arbres ne présentaient qu'environ 1 cm de cambium vivant, la moyenne de l'indice de cambium vivant étant de 20,5% (Tableau 2.5). Aucune relation n'a été décelée entre cet indice et l'âge des arbres (Fig. 2.8), ceux-ci ayant déjà presque tous (86,5%) une mortalité cambiale très avancée avec un indice inférieur à 30%. La figure 2.9 montre l'angle compris entre l'exposition générale de l'arbre et l'orientation de la partie résiduelle de cambium. Dans 80% des cas, la zone de cambium vivant est orientée à plus de 90° par rapport à l'exposition de l'arbre, c'est-à-dire dans une direction générale tournée vers l'intérieur des terres. En contrepartie, beaucoup moins d'arbres ($X^2 = 18,77$ $p < 0,01$) ont leur cambium orienté dans le même sens que l'exposition de l'arbre (vers le lac).

Il existe une étroite relation entre la surface foliaire et la surface d'aubier (Fig. 2.10) ($r = 0,99$ $p < 0,0001$), le rapport étant de 0,79 unité (m^2) de surface photosynthétique pour 1,00 unité (cm^2) d'aubier. Une transformation logarithmique des données n'ayant pas augmenté le coefficient de détermination (r^2), la relation présentée concerne les données non transformées. C'est à partir d'un sous-échantillon de 50 rameaux que le facteur de conversion entre surface foliaire et poids sec a été établi. Cette relation hautement significative ($r = 0,98$ $p < 0,0001$) est présentée à l'Annexe F.

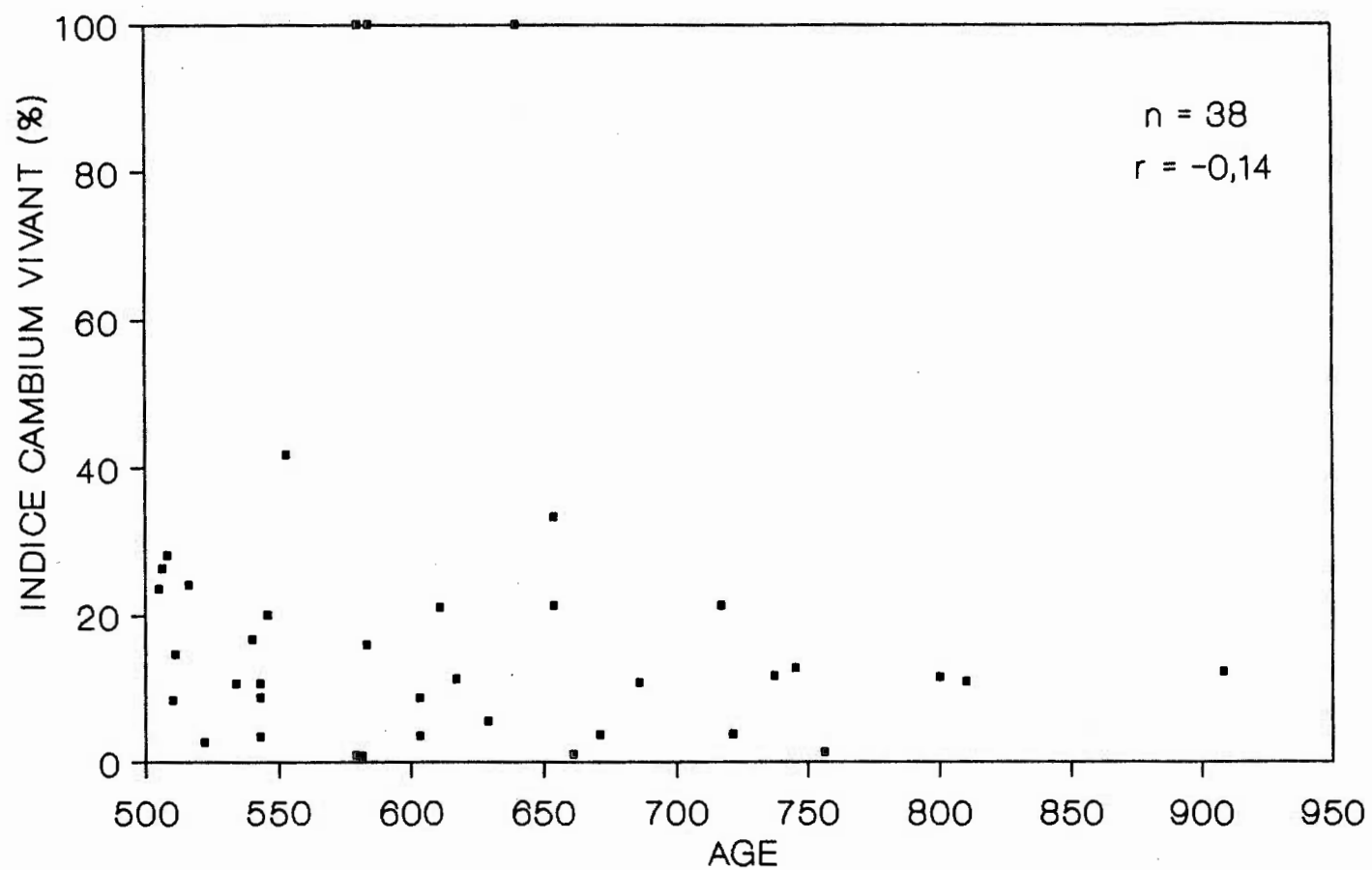


Figure 2.8 Indice de cambium vivant en fonction de l'âge estimé pour les arbres sur sites xériques.

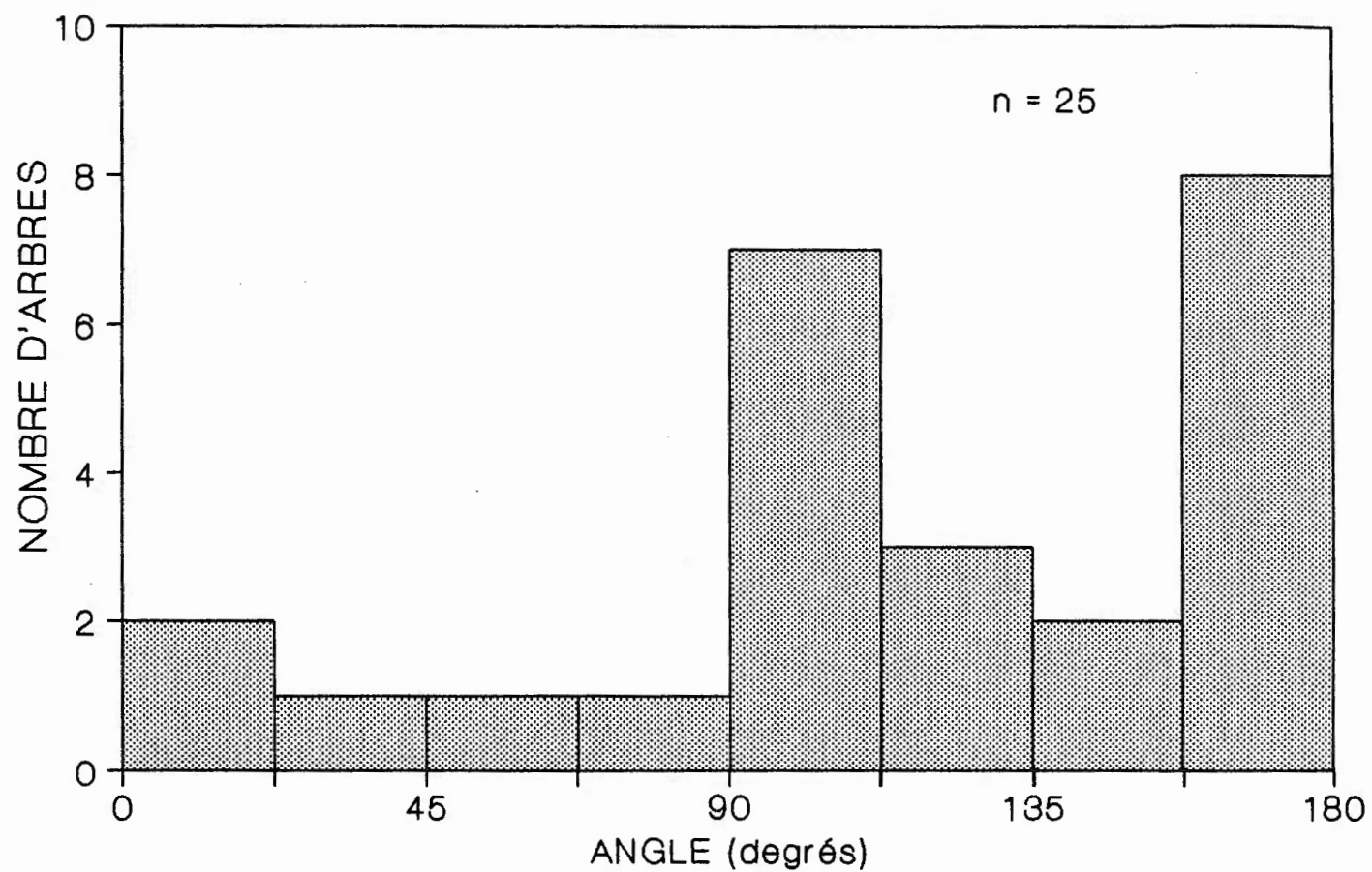


Figure 2.9 Distribution de l'angle entre l'exposition de l'arbre et l'orientation de la partie de cambium vivant pour les arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.

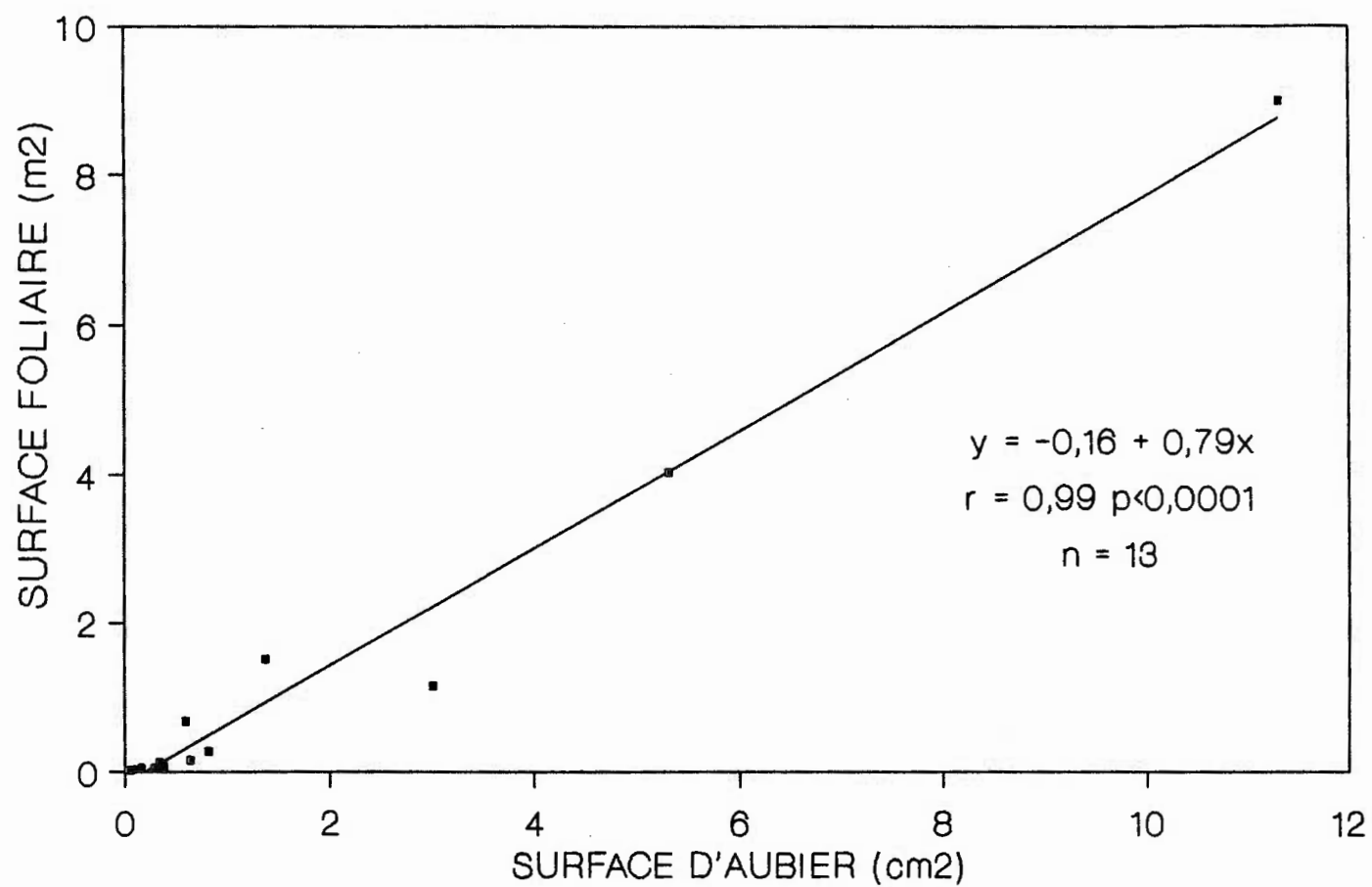


Figure 2.10 Relation entre la surface foliaire et la surface d'aubier pour 13 arbres sur sites xériques (âge variant de 5 à 756 ans).

Afin de vérifier la justesse des estimations visuelles de volume foliaire, les estimations effectuées sur les 5 vieux arbres (Fig. 2.10) ont été comparées aux surfaces foliaires calculées. (Annexe G). La relation est hautement significative ($p < 0,005$) et elle accorde une certaine crédibilité à l'ensemble des estimations visuelles de feuillage. La relation déjà démontrée entre la surface photosynthétique et la surface d'aubier a ainsi pu être étendue à 23 vieux arbres (Fig. 2.11). L'estimation visuelle de volume foliaire y a été convertie en surface foliaire à l'aide de la relation de l'Annexe G [$y(\text{cm}^2) = 0,06 + 15,12x(\text{m}^3)$]. Il est difficile d'évaluer la surface d'aubier sans couper l'arbre. On a utilisé le périmètre de tronc recouvert d'écorce comme une estimation du périmètre de cambium vivant et ce périmètre a été utilisé, faute de mieux, comme une estimation de la surface d'aubier. Bien que basée sur deux types d'estimations relativement grossières, la relation obtenue entre tissu photosynthétique et non-photosynthétique est quand même très hautement significative ($r = 0,76$ $p < 0,001$).

4.4 Régénération sur sites xériques

La structure d'âge (classes de 5 ans) des 203 jeunes arbres de moins de 5 cm de diamètre au sol (Fig. 2.12a) montre une population inéquienne avec une décroissance classique en J-inversé. Cependant, on peut observer une baisse marquée dans la régénération des 3 dernières classes (1972-1986). Une corrélation hautement

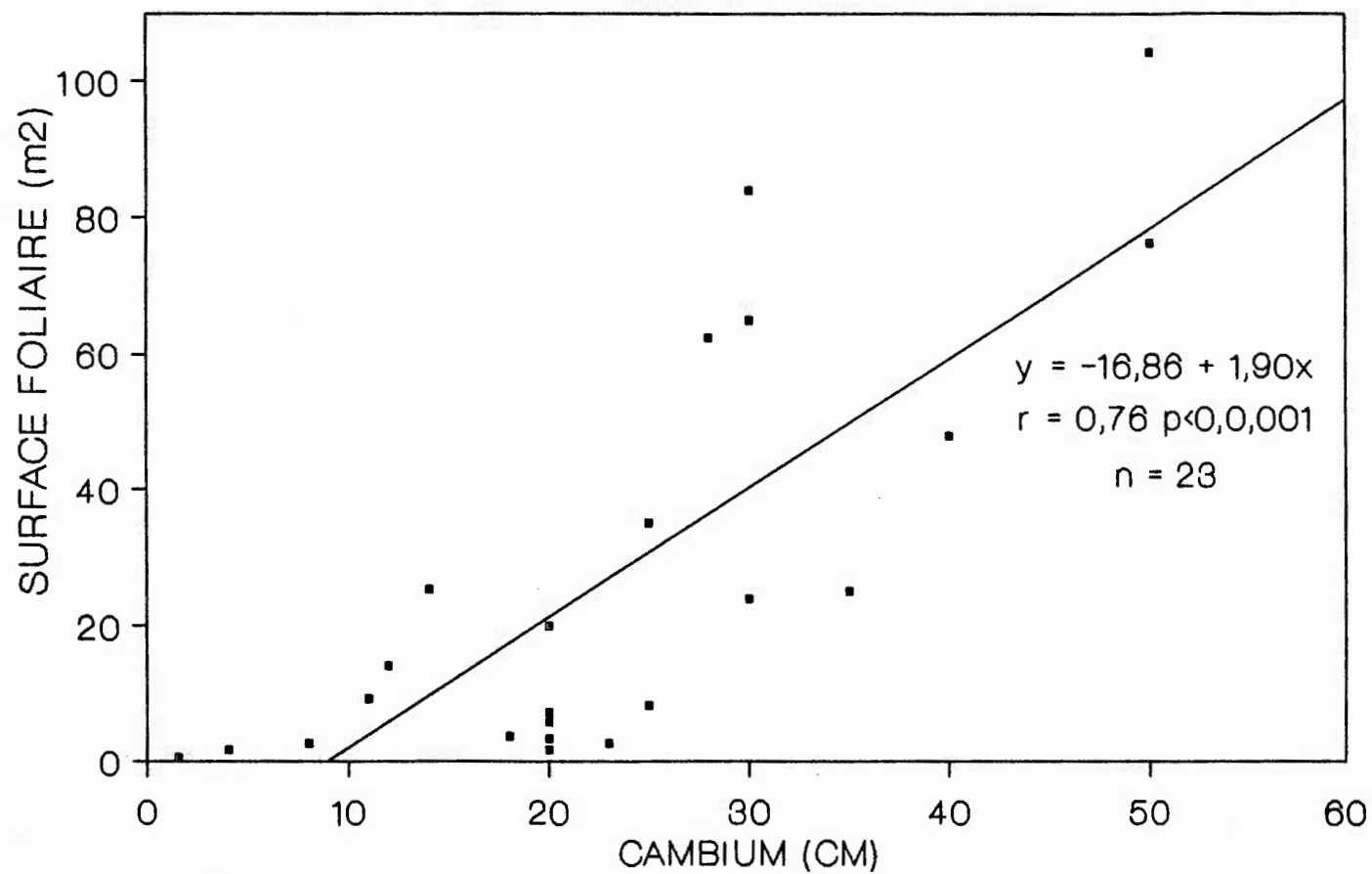


Figure 2.11 Relation entre la surface foliaire et la largeur de cambium vivant pour 23 arbres d'âge estimé supérieur à 500 ans sur sites xériques.

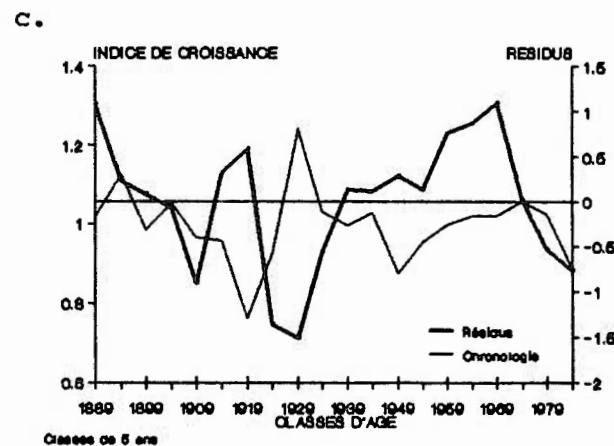
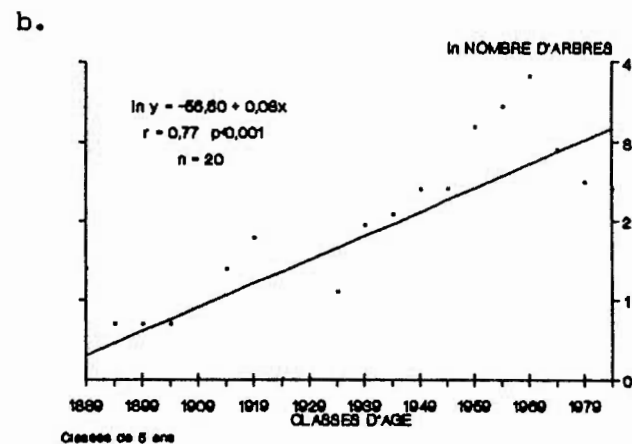
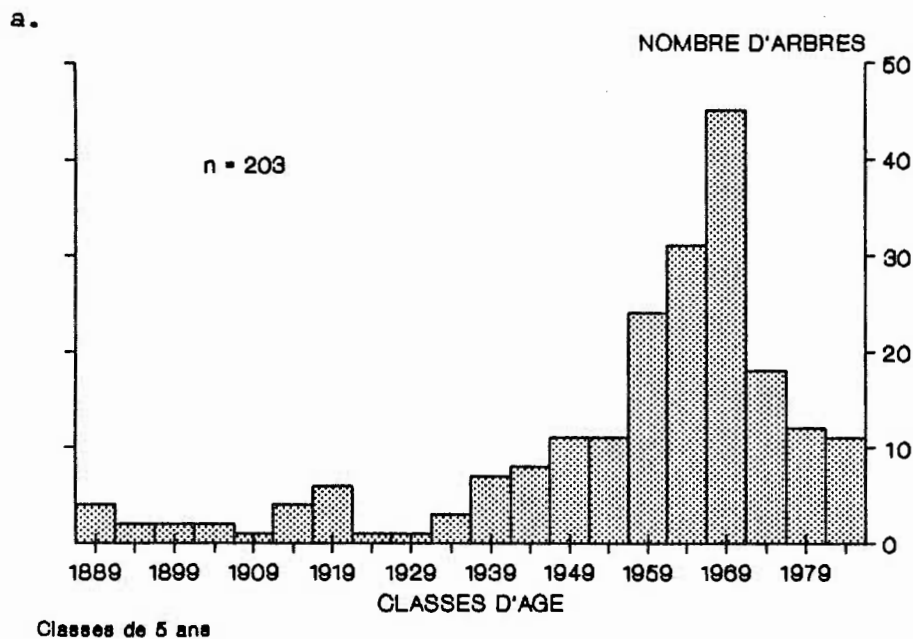


Figure 2.12 a.) Structure d'âge des jeunes arbres sur sites xériques provenant de régénération sexuée. b.) Régression exponentielle de la structure d'âge. c.) Distribution des résidus de la régression exponentielle et comparaison avec la chronologie maîtresse du cèdre blanc.

significative a été obtenue avec une fonction exponentielle négative ($\ln y = -56,60 + 0,03125x$; $r = 0,77$ $p < 0,001$) (Fig. 2.12b). Les résidus de cette régression ne semblent toutefois pas reliés avec la chronologie indicée (régressions polynomiales) obtenue au Chapitre I et indicatrice des conditions de croissance pour le cèdre blanc sur sites xériques ($r = 0,16$) (Fig. 2.12c).

5. Discussion

La découverte d'un spécimen de cèdre blanc de plus de 900 ans au lac Duparquet a permis d'allonger la longévité connue pour l'espèce de près de 200 ans (Tableau 2.6). De plus, si l'on consi-

Tableau 2.6. Records de longévité pour Thuja occidentalis

Site	Age minimum (cernes)	Age estimé	Référence
Lac Duparquet, Qué.	869	908	Présente étude
Lac Duparquet, Qué.	779	810	Présente étude
Milton, Ont.		723	Larson (Anonyme 1988)
Upper peninsula, Mich.	170	657	Wells <u>et al.</u> (1983)
Monts Chic-Chocs, Qué	578		Cook (comm. pers., 1986)
Manitou Island, Mich.	530		Wells <u>et al.</u> (1983)

dère la hauteur d'où provient la carotte (0,50 m) et le taux de croissance extrêmement faible sur les sites xériques, cet arbre pourrait très bien exister depuis plus d'un millénaire. Exception faite d'une mention de 988 ans, au début du siècle, pour la pruche [*Tsuga canadensis* (L.) Carr.] (Fowells 1965), ce spécimen de cèdre blanc pourrait être le plus vieil arbre connu dans tout le nord-est de l'Amérique du Nord.

Malgré une recherche intensive, la très grande majorité des cèdres blancs de plus de 500 ans ont été découverts, au lac Duparquet, sur des sites xériques où la croissance est très faible (cf. chapitre I). De plus, ces vieux arbres ont pratiquement tous une croissance unilatérale, ce qui a pour effet de dénuder une partie du xylème. Celui-ci est exposé à l'effet abrasif des vents dominants (Fig. 2.6, 2.9) et des glaces, une indication que ces deux facteurs contribuent sans doute à l'initiation de la mortalité cambiale. Cependant, l'exposition aux vents pourrait aussi avoir un effet de dessiccation et de conservation sur le xylème, les parties exposées étant souvent très anciennes mais toujours exemptes de pourriture.

Le cèdre blanc parvient donc à vivre très longtemps, en particulier sur les sites stressants, et plusieurs facteurs peuvent être impliqués. Tout d'abord, le fait que très peu d'insectes nuisibles s'attaquent au cèdre blanc (Fowells 1965) n'est sans doute pas étranger à la grande longévité de l'espèce. Il importe aussi de

mentionner sa résistance aux champignons et bactéries responsables de la pourriture du bois (Maruzzella et Liguori 1958), résistance qui semblerait due à la présence de thujaplicines (Roy et al. 1984). Cet extrait est aussi présent chez le cèdre de l'ouest (Thuja plicata Donn) et il a été démontré que les individus âgés de plusieurs centaines d'années et à croissance très lente en contiennent beaucoup plus que les jeunes arbres à croissance rapide (Nault 1988). Tout comme pour le cèdre blanc au lac Duparquet, LaMarche (1969), Luckman et al. (1984), Pruden et al. (1987) et plusieurs autres ont aussi constaté une plus grande longévité chez les arbres des sites les plus secs. La formation d'un type de bois plus résistant à la pourriture est une explication possible et il serait intéressant de vérifier si les vieux cèdres blancs à croissance lente contiennent effectivement un taux plus élevé de thujaplicines.

Le pourcentage d'eau du bois est un autre facteur de grande importance. Il se doit d'être aussi faible que possible pour empêcher le développement des moisissures et assurer ainsi une bonne conservation (Haygreen et Bowyer 1982). Le cèdre blanc est avant tout une espèce dont le duramen est particulièrement pauvre en eau [31 à 38% du poids sec selon Kramer et Kozlowski (1979)]. Ceci pourrait très bien être accentué par le caractère xérique des sites et par l'effet desséchant du vent, effet qui a déjà été observé chez Pinus longaeva (Beasley et Klemmedson 1973).

En plus de permettre au xylème de se dessécher et de mieux se conserver, la croissance unilatérale permet aux vieux cèdres blancs de maintenir constant le rapport entre tissus photosynthétiques et non-photosynthétiques ($0,79 \text{ m}^2 : 1,00 \text{ cm}^2$). Ce type de comportement sur sites très secs a aussi été noté, par exemple, chez Pinus longaeva (Wright et Mooney 1965) et chez Pinus flexilis (Pruden et al. 1987) et pourrait être un facteur augmentant la longévité. Comme l'apport en eau de ces arbres est très limité sur les affleurements rocheux, ils ne peuvent supporter qu'un très faible volume de feuillage. La croissance unilatérale dont ils font preuve leur permet donc, à chaque année, de n'ajouter qu'une quantité constante de tissu non-photosynthétique et de parvenir ainsi à conserver le rapport constant. Plusieurs travaux ont déjà montré un lien entre la surface d'aubier et la surface photosynthétique chez quelques espèces (Whitehead 1978; Kaufman et Troendle 1981; Miller et al. 1987). En croissant, les arbres augmentent de façon géométrique leur quantité de tissu non-photosynthétique (aubier) et la surface de feuillage doit suivre le même taux d'augmentation pour subvenir aux besoins. La relation entre les deux types de tissus serait due à deux éléments: 1) le taux de transpiration du feuillage est proportionnel à sa surface et le taux d'arrivée d'eau dans la cime est proportionnel à la surface des vaisseaux contenus dans l'aubier (Shinozaki et al. 1964).

Pour des raisons encore peu connues, le cèdre blanc montre souvent une mortalité de la cime (Curtis 1946). Cette perte de dominance apicale amène parfois une branche à se développer au point de remplacer l'ancienne cime et conserve ainsi à l'arbre une petite taille. Les vieux cèdres blancs du lac Duparquet présentent ce caractère d'une façon très marquée (Fig. 2.7), ce qui pourrait favoriser leur longévité. En effet, Went (1942) et Westing (1964) croient que ce caractère permet aux arbres de conserver leur cime à une faible distance du sol et de réduire ainsi les effets néfastes de la sénescence qui rend le transport d'eau vers la cime de plus en plus difficile (Fritts 1976). La nature xérique des sites au lac Duparquet, en imposant un stress hydrique, vient peut-être amplifier ce phénomène.

L'ensemble des caractéristiques mentionnées peuvent expliquer, dans une certaine mesure, la grande longévité du cèdre blanc. D'autres facteurs interviennent sans doute puisque les vieux cèdres blancs ne croissent que sur les affleurements rocheux près de la rive malgré la présence d'affleurements similaires à l'intérieur des terres. En forêt boréale les feux constituent une perturbation majeure (Rowe et Scotter 1973) et il est possible qu'ils empêchent la longévité potentielle du cèdre blanc de s'exprimer pleinement. C'est ce qu'on peut observer au lac Duparquet alors que les plus vieux spécimens semblent croître sur des sites où l'impact des feux

est diminué. Tout d'abord, malgré une abondance de cèdres blancs autant sur les îles que sur les berges (Bergeron et Dubuc 1989), la majorité des vieux individus se retrouvent sur les îles. Il est possible que la nature des feux insulaires y joue un rôle, ceux-ci étant souvent des feux de surface de faible intensité (Bergeron et Gagnon 1987). La grande majorité des vieux spécimens se retrouvent en outre dans une mince lisière en marge des forêts où les feux viennent s'éteindre et où la végétation clairsemée rend leur propagation difficile.

Il faut aussi considérer la nature aléatoire de l'allumage des feux. Sur la terre ferme, les feux couvrent de grandes étendues et il est plutôt rare qu'une zone échappe plus de 250 ans à leur passage (Rowe et Scotter 1973), sauf dans les endroits très bien protégés. En milieu insulaire, au contraire, l'allumage doit se faire sur le site même. Il est donc possible, particulièrement pour les îles de faible superficie, d'échapper au feu très longtemps. C'est ce qu'on semble observer avec les îles K-09, O-01 et P-12g qui hébergent 9 des 12 plus vieux arbres et qui, de par leur accumulation de matière organique, semblent avoir échappé aux feux depuis des centaines d'années. Même si certaines îles ou berges ont subi un feu récent, leur topographie (petite pointe sur l'île J-03, zones de roc nu souvent très escarpées sur d'autres îles, etc.) peut constituer un excellent coupe-feu. Le fait que la partie de cambium

vivant soit surtout orientée vers la forêt (Fig. 2.9) montre bien que ces arbres ont pu échapper depuis longtemps à l'action destructrice des feux.

Des facteurs météorologiques comme le vent ont une grande influence sur le comportement d'un feu (Van Wagner 1983), autant au niveau de l'allumage que de la propagation. Au lac Duparquet, ceci pourrait expliquer la concentration des plus vieux individus précisément face aux vents dominants, malgré l'abondance de sites potentiels à d'autres exposition. Il est possible que d'une façon générale, la propagation des feux s'effectue plutôt selon un axe ouest-est et qu'ils éliminent progressivement les vieux individus des rives orientées vers l'est. Il semblerait que les feux les plus importants aient effectivement un tel type de comportement au lac Duparquet (Bergeron et Brisson 1990).

Le cèdre blanc est une espèce très sensible aux feux (Starker 1934): ses racines sont superficielles, son écorce est mince et riche en résine (Fowells 1965), son feuillage hautement inflammable touche souvent le sol et il n'arrive pas à se régénérer végétativement après feu (Heinselman 1981). De plus, la dissémination des graines ne dépasse pas 50 à 60 m (Fowells 1965). Tous ces facteurs ont sans doute contribué, en forêt boréale, une région où les feux sont généralement intenses et de grande superficie (Van Wagner 1983), à restreindre la distribution du cèdre blanc aux zones où les

feux ont le moins d'impact comme les bordures de plans d'eau (Heinselman 1973). La distribution limitée d'autres espèces comme Pinus resinosa Ait. (Bergeron et Gagnon 1987), Juniperus communis L. (Diotte et Bergeron 1989), Fraxinus nigra et Ulmus americana (Carleton et Maycock 1978) est aussi expliquée par une mauvaise régénération après les feux de forte intensité, ce qui amènerait graduellement leur élimination des zones incendiées. Même s'il est très abondant en bordure des plans d'eau, le cèdre blanc ne semble atteindre son âge maximal que dans de petits refuges qui, soit par un effet du hasard, soit à cause d'une topographie particulière, ont pu échapper aux feux depuis longtemps.

Même en absence de feux, la régénération par graine sur sites xériques n'est pas assurée et elle semble problématique depuis une quinzaine d'années (Fig. 2.12a). Cette baisse ne peut être liée aux cycles de production de graines qui sont de 3 à 5 ans chez le cèdre blanc (Fowells 1965). Un effet climatique est toutefois possible puisque les jeunes pousses sont très sensibles aux sécheresses (Nelson 1951) ainsi qu'aux gels (Curtis 1946) durant la période de germination (mai-juin). Aucune relation ($r = 0,16$) ne semble cependant exister avec la chronologie du cèdre blanc (Fig. 2.12c). Même si les deux courbes montrent une chute récente, ce n'est peut-être que le fruit du hasard puisqu'elles ont des comportements contradictoires à d'autres périodes. Bergeron et Gagnon (1987)

observent cependant une chute de régénération récente similaire pour Pinus resinosa, une indication qu'un facteur climatique est peut-être à l'oeuvre. Il y aurait donc lieu, éventuellement, d'examiner les données météorologiques quotidiennes des 15 dernières années pour tenter d'y déceler des stress ponctuels (gels, sécheresses) pouvant influencer l'établissement des semis.

Le cèdre blanc semble donc être l'espèce qui atteint la plus grande longévité dans le nord-est de l'Amérique du Nord. Cependant, il est très rare qu'un individu survive jusqu'à cette longévité potentielle. Ceux qui parviennent à s'en approcher, au lac Duparquet, croissent dans des sites xériques où l'environnement semble imposer une morphologie et un taux de croissance favorables à une grande longévité. Les perturbations jouent, quant à elles, un rôle très important en empêchant les arbres d'atteindre leur longévité maximale sauf dans certains sites protégés. C'est ainsi que les vieux cèdres blancs sont confinés majoritairement aux îles où les feux sont de plus faible intensité. De plus, ils se trouvent restreints à une étroite bande entre les feux d'une part et les glaces de l'autre. Nous sommes donc en présence d'une interaction complexe entre des facteurs édaphiques, topographiques et de perturbation qui influencent à la fois la distribution de l'espèce mais aussi la répartition des plus vieux individus.

6. Bibliographie

- Anonyme. 1982. Normales climatiques au Canada. Vol. 2: Température, 306 pages. Vol. 3: Précipitation, 602 pages. Vol. 5: Vent, 283 pages. Vol. 6: Gel, 276 pages. Environnement Canada. Ottawa.
- Anonyme. 1988. Ancient forest discovered on Niagara escarpment. Atlantic Forestry Journal (Oct.). p.6.
- Beasley, R.S. et Klemmedson, J.O. 1973. Recognizing site adversity and drought-sensitive trees in stands of bristlecone pine (Pinus longaeva). Economic Botany 27: 141-146.
- Beasley, R.S. et Klemmedson, J.O. 1980. Ecological relationships of bristlecone pine. The American Midland Naturalist 104: 242-252.
- Bergeron, Y. 1985. Comm. pers. Dept. Biologie. Université du Québec à Montréal. Montréal.
- Bergeron, Y. et Archambault, S. En prép. Relation between fire frequency in the Quebec boreal forest and recent climatic change.
- Bergeron, Y., Bouchard, A., Gangloff, P. et Camiré, C. 1983. La classification écologique des milieux forestiers de la partie ouest des cantons d'Hébertcourt et de Roquemaure, Abitibi, Québec. Etudes écologiques no. 9. Lab. d'écologie forestière. Univ. Laval. Québec. 169 pages.
- Bergeron, Y., Bouchard, A. et Massicotte, G. 1985. Gradient analysis in assessing differences in community pattern of three adjacent sectors within Abitibi, Quebec. Vegetatio 64: 55-65.
- Bergeron, Y. et Brisson, J. 1990. Fire regime in red pine stands at the northern limit of the species' range. Ecology, sous presse.
- Bergeron, Y. et Dubuc, M. 1989. Succession in the southern part of the Canadian boreal forest. Vegetatio 79: 51-63.
- Bergeron, Y. et Gagnon, D. 1987. Age structure of red pine (Pinus resinosa Ait.) at its northern limit in Quebec. Canadian Journal of Forest Research 17: 129-137.
- Carleton, T.J. et Maycock, P.F. 1978. Dynamics of the boreal forest south of James Bay. Canadian Journal of Botany 56: 1157-1173.

- Clayden, S. et Bouchard, A. 1983. Structure and dynamics of conifer-lichen stands on rock outcrops south of Lake Abitibi, Quebec. *Canadian Journal of Botany* 61: 850-871.
- Cook, E.R. 1986. Comm. pers. Lomont-Doherty Geological Observatory, Columbia University, Palisades, N.Y. 10964.
- Curtis, J.D. 1946. Preliminary observations on northern white cedar in Maine. *Ecology* 27: 23-36.
- Diotte, M. et Bergeron, Y. 1989. Fire and the distribution of Juniperus communis in the boreal forest of Québec, Canada. *Journal of Biogeography* 16: 91-96.
- Douglass, A.E. 1941. Crossdating in dendrochronology. *Journal of Forestry* 39: 825-831.
- Edwards, M.E. et Dunwiddie, P.W. 1985. Dendrochronological observations on Populus balsamifera in northern Alaska, U.S.A. *Arctic and Alpine Research* 17: 271-278.
- Fernald, M.L. 1919. Lithological factors limiting the ranges of Pinus banksiana and Thuja occidentalis. *Rhodora* 243: 41-67.
- Fowells, H.A. 1965. Silvics of forest trees of the United States. USDA. For. Serv. Handbook No. 271.
- Fritts, H.C. 1976. Tree rings and climate. Academic Press. New York. 567 pages.
- Graham, R.B. 1954. Parties des cantons d'Hébécourt, de Duparquet et de Destor, Comté d'Abitibi-Ouest. Qué (Prov.). Rap. Géol. no. 61. Ministère des Mines du Québec. 73 pages.
- Grandtner, M.M. 1966. La végétation forestière du Québec méridional. Presses de l'Université Laval. Québec. 216 pages.
- Haygreen, J.G. et Bowyer, J.L. 1982. Forests products and wood science. Iowa State University Press. Logan.
- Heinselman, M.L. 1973. Fire in the virgin forests of the boundary waters canoe area, Minnesota. *Quaternary Research* 3: 329-382.
- Heinselman, M.L. 1981. Fire and succession in the conifer forests of northern North America. Dans "Forest succession", West, D.C., Shugart, H.H. et Botkin, D.B. (éds.), pp.374-405. Springer-Verlag. New York. 517 pages.

- Hosie, R.C. 1978. Arbres indigènes du Canada. Fides. Montréal. 389 pages.
- Kaufman, M.R. et Troendle, C.A. 1981. The relationship of leaf area and foliage biomass to sapwood conducting area in four subalpine forest tree species. *Forest Science* 27: 477-482.
- Kramer, P.J. et Kozlowski, T.T. 1979. Physiology of woody plants. Academic Press. New York. 811 pages.
- LaMarche, V.C.Jr. 1969. Environment in relation to age in bristlecone pines. *Ecology* 50: 53-59.
- Luckman B.H., Jozsa, L.A. et Murphy, P.J. 1984. Living seven-hundred-year-old Picea Engelmannii and Pinus Albicaulis in the Canadian Rockies. *Arctic and Alpine Research* 16: 419-422.
- Maruzzella, J.C. et Liguori, L. 1958. The in vitro antifungal activity of essential oils. *Journal of the American Pharmacological Association* 47: 250-254.
- Miller, R.F., Eddleman, L.E. et Angell, R.F. 1987. Relationship of western juniper stem conducting tissue and basal circumference to leaf area and biomass. *The Great Basin Naturalist* 47: 349-354.
- Nault, J. 1988. Radial distribution of thujaplicins in old growth and second growth western red cedar (Thuja plicata Donn). *Wood Science and Technology* 22: 73-80.
- Nelson, T.C. 1951. A reproduction study of northern white cedar. Mich. Dept. Conserv. Lansing. 100 pages.
- Payette, S., Fillion, L., Gauthier, L. et Boutin, Y. 1985. Secular climate change in old-growth tree-line vegetation of northern Quebec. *Nature* 315: 135-138.
- Pruden, M.A., Fryer, G.I., et Johnson E.A. 1987. Fire frequency and old trees in the southern canadian Rockies. Dans "International symposium on ecological aspects of tree-ring analysis proceedings. Jacoby, G.C.Jr. et J.W. Hornbeck, J.W. (éds.), pp.175-179. U.S. Dept. of Energy Conference Report. Washington, D.C. 726 pages.
- Robertson, E.O. et Jozsa, L.A. 1988. Climatic reconstruction from tree rings at Banff. *Canadian Journal of Forest Research* 18: 888-900.

- Rousseau, C. 1974. Géographie floristique du Québec-Labrador. Presses Univ. Laval. Québec. 799 pages.
- Rowe, J.S. 1972. Les régions forestières du Canada. Ministère de l'Environnement. Service Canadien des Forêts. Information Canada, Publ. 1300F. 172 pages.
- Rowe, J.S. et Scotter, G.W. 1973. Fire in the boreal forest. Quaternary Research 3: 444-464.
- Roy, D.N., Konar, S.K. et Purdy, J.R. 1984. Sublimation of occidantalol, a sesquiterpene alcohol, from eastern white cedar (*Thuja occidentalis*) in a drying kiln. Canadian Journal of Forest Research 14: 401-403.
- Shinozaki, K., Yoda, K., Hozumi, K. et Kira, T. 1964. A quantitative analysis of plant form - The pipe model theory. I. Basic analyses. Japanese Journal of Ecology 14: 97-105.
- Schulman, E. 1954. Longevity under adversity in conifers. Science 119: 396-399.
- Schulman, E. 1958. Bristlecone pine, oldest known living thing. The National Geographic Magazine 113: 355-372.
- Scott, M.L. et Murphy, P.G. 1987. Regeneration patterns of northern white cedar, an old-growth forest dominant. The American Midland Naturalist 117: 10-16.
- Stahle, D.W., Cleaveland, M.K. et Hehr, J.G. 1988. North Carolina climate changes reconstructed from tree rings: A.D. 372 to 1985. Science 240: 1517-1519.
- Starker, T.J. 1934. Fire resistance in the forest. Journal of Forestry 32: 462-467.
- Van Wagner, C.E. 1983. Fire behaviour in northern conifer forests and shrublands. Dans "The role of fire in northern circumpolar ecosystems", Wein, R.W. et MacLean, D.A. (éds.), pp.65-80. John Wiley.
- Vincent, J.S. et Hardy, L. 1977. L'évolution et l'extinction des lacs glaciaires Barlow et Ojibway en territoire québécois. Géographie Physique et Quaternaire 31: 357-372.
- Wagener, W.W. 1954. Longevity under adversity in conifers (comment). Science 119: 883-884.

- Walker, G.L. 1987. Ecology and population biology of Thuja occidentalis L. in its southern disjunct range. Ph. D. thesis. University of Tennessee, Knoxville. 160 pages.
- Wells, J.R., Thompson, P.W. et Fons, G.P. 1983. Some Michigan upper peninsula big trees and their age estimates. The Michigan Botanist 23: 3-10.
- Went, F.W. 1942. Some physiological factors in the aging of a tree. Proceedings of the 18th National Shade Tree Conference, pp.330-334.
- Westing, A.H. 1964. The longevity and aging of trees. Gerontologist 4: 10-15.
- Whitehead, D. 1978. The estimation of foliage area from sapwood basal area in Scots Pine. Forestry 51: 137-149.
- Wright, R.D. et Mooney, H.A. 1965. Substrate-oriented distribution of bristlecone pine in the White Mountains of California. The American Midland Naturalist 73: 257-284.

CONCLUSION GENERALE

L'analyse des vieux cèdres blancs croissant sur sites xériques a permis de démontrer leur potentiel dendrochronologique et dendroclimatique. En effet, les arbres montrent très peu de cernes anormaux (cernes absents ou doubles), ils interdatent relativement bien, ils comportent un bon pourcentage de variance commune et sont dotés d'une grande longévité. Leur croissance radiale semble surtout dépendante des précipitations du mois de juin et il a été possible d'utiliser cette relation pour estimer les changements à long terme de pluviosité ayant pu survenir dans la région. En outre, la chronologie de 802 ans qui a été construite constitue maintenant un outil de travail intéressant pour mieux dater, par exemple, des cicatrices de feu ou de glace.

La distribution de ces vieux arbres est dépendante à la fois de facteurs édaphiques, topographiques et historiques. Leur grande longévité semble, en effet, liée à la faible croissance sur les sites xériques et aux caractéristiques du bois qui en découlent. Elle est aussi liée à la faible intensité ou à la faible fréquence de feux que l'on peut observer sur certains sites privilégiés comme les rives xériques d'îles ou de berges. Ces caractéristiques peuvent maintenant servir de guide pour chercher plus efficacement des spécimens très âgés dans d'autres régions et ajouter une dimension spatiale aux données dendroclimatiques recueillies.

Compte tenu de la rareté de ces vieux arbres, de leur potentiel dendroclimatique ainsi que du manque flagrant de connaissances sur la longévité des arbres, il importe de leur assurer une protection particulière. Leur condition est d'autant plus précaire qu'ils sont limités à un très petit nombre de sites. Il serait donc dommage qu'ils disparaissent après avoir survécu aussi longtemps.

ANNEXE A

Estimation des observations météorologiques manquantes
à Iroquois Falls (Ont.) à partir de celles de Cochrane (Ont.)

Estimation de la température moyenne mensuelle à Iroquois Falls (I)
à partir de celle mesurée à Cochrane (C).

Mois	Equation linéaire ($y = a + bx$)	
Janvier	$I = -0,66 + 0,98xC$	$r = 0,94$
Février	$I = 0,64 + 1,07xC$	$r = 0,94$
Mars	$I = -0,65 + 0,94xC$	$r = 0,91$
Avril	$I = 0,46 + 0,84xC$	$r = 0,86$
Mai	$I = 1,02 + 0,93xC$	$r = 0,91$
Juin	$I = 1,05 + 0,95xC$	$r = 0,87$
Juillet	$I = 1,96 + 0,90xC$	$r = 0,84$
Août	$I = 1,89 + 0,89xC$	$r = 0,86$
Septembre	$I = 0,88 + 0,94xC$	$r = 0,91$
Octobre	$I = 0,74 + 0,90xC$	$r = 0,96$
Novembre	$I = 0,42 + 1,05xC$	$r = 0,97$
Décembre	$I = -0,34 + 0,97xC$	$r = 0,95$

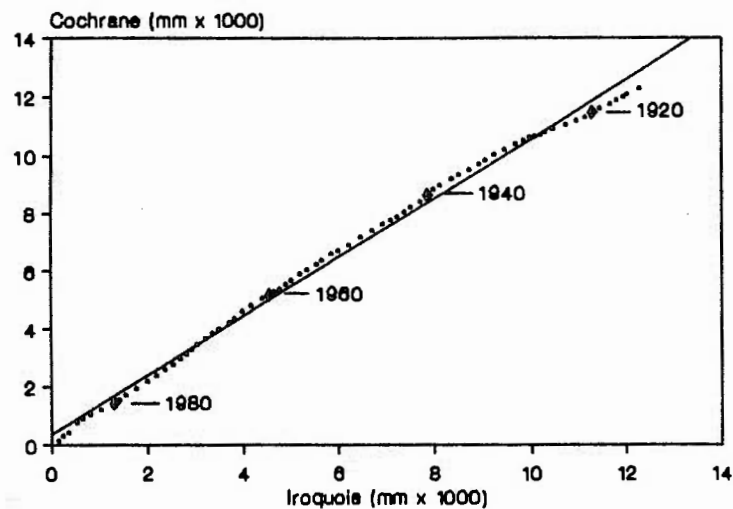
Estimation de la précipitation totale mensuelle à Iroquois Falls
(I) à partir de celle mesurée à Cochrane (C).

Mois	Rapport I / C
Janvier	0,93
Février	0,97
Mars	1,10
Avril	1,01
Mai	0,93
Juin	0,92
Juillet	0,96
Août	1,03
Septembre	0,97
Octobre	1,00
Novembre	0,99
Décembre	0,97

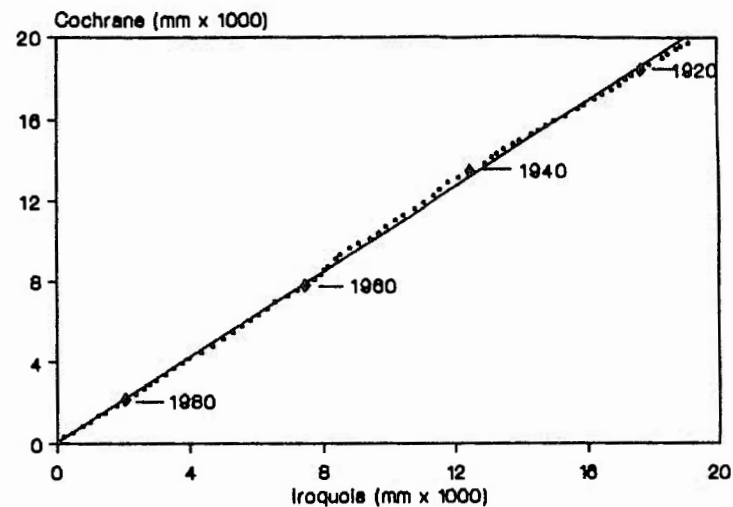
ANNEXE B

Vérification de l'homogénéité des enregistrements
de précipitation totale mensuelle et de température moyenne
à Iroquois Falls (Ont.).

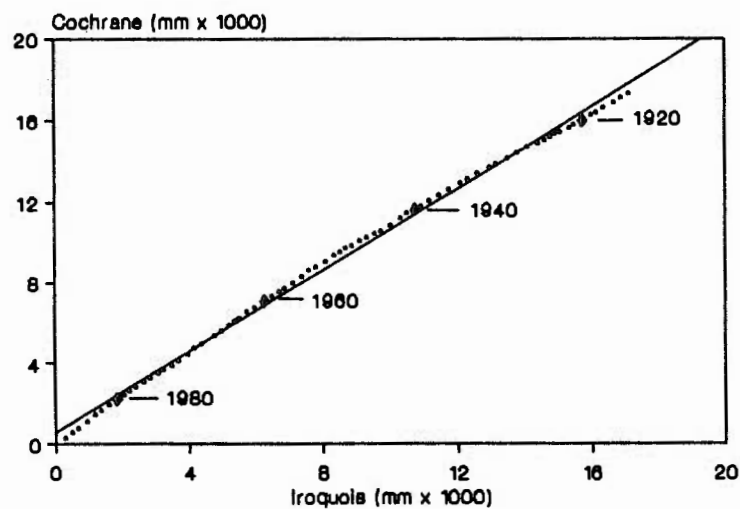
**Précipitation totale cumulée
Mars - Mai**



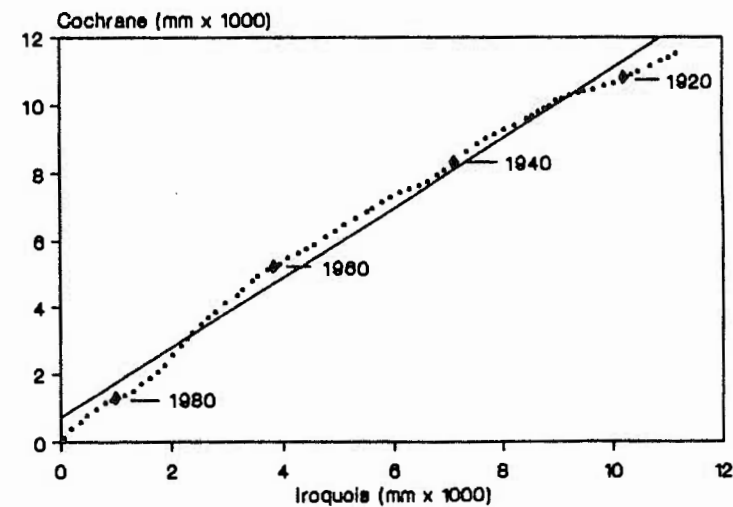
**Précipitation totale cumulée
Juin - Août**



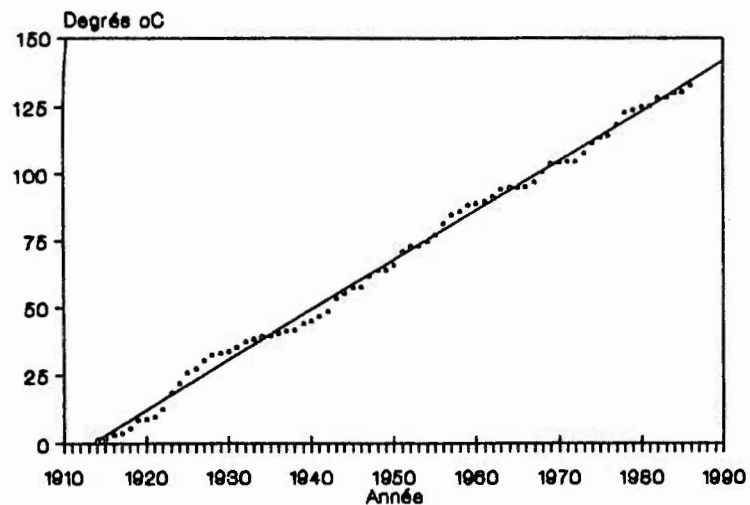
**Précipitation totale cumulée
Septembre - Novembre**



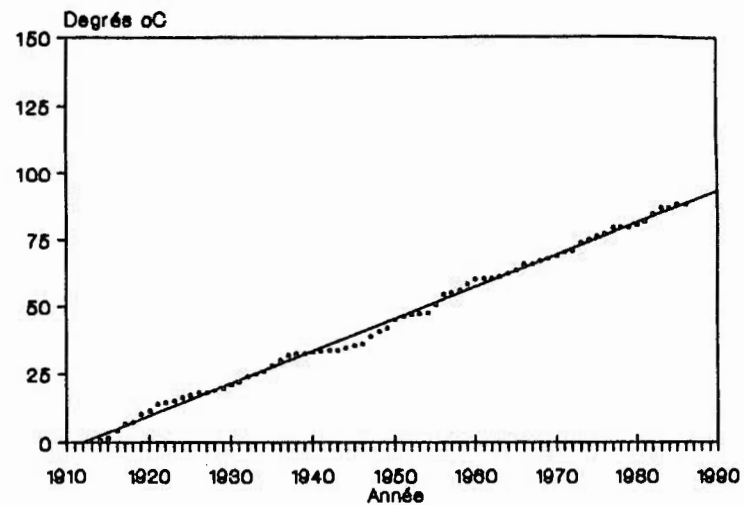
**Précipitation totale cumulée
Décembre - Février**



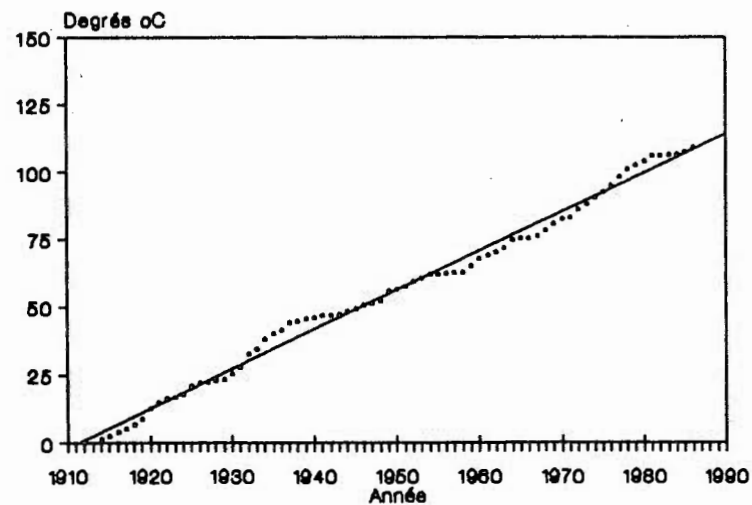
**Différences de température cumulées
Mars - Mai**



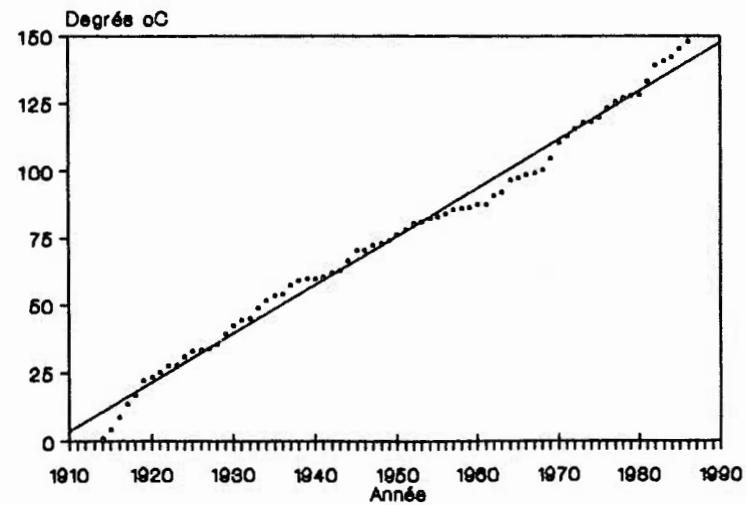
**Différences de température cumulées
Juin - Août**



**Différences de température cumulées
Septembre - Novembre**



**Différences de température cumulées
Décembre - Février**



ANNEXE C

Liste des indices de la chronologie maitresse
(régressions polynomiales)

Année	Chronologie standardisée (polynômes)										Nombre d'arbres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1490	0.832	1.062	0.962	0.741	0.751	0.621	0.689	1.006	1.054	0.879	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24
1500	1.014	0.825	0.902	1.000	1.210	1.060	1.263	1.233	1.337	1.207	24	24	25	26	26	26	26	26	26	26
1510	0.999	1.144	1.069	1.128	1.163	1.118	1.157	1.050	1.102	1.030	28	28	28	28	28	29	29	29	30	31
1520	1.254	1.332	1.194	1.070	0.912	1.113	1.163	1.251	1.070	1.132	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
1530	0.812	0.832	0.874	0.819	0.990	1.278	1.337	0.995	0.861	0.858	31	31	31	31	32	32	32	32	32	32
1540	1.128	1.005	1.032	1.179	1.022	1.045	0.919	0.981	0.921	0.909	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
1550	0.673	0.807	0.982	0.915	1.072	1.103	1.016	0.950	0.850	0.831	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
1560	0.834	0.963	0.717	0.809	0.882	0.901	0.860	0.939	1.005	0.805	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
1570	0.874	1.040	0.810	1.115	1.227	0.989	1.363	0.904	0.807	0.759	32	32	32	32	32	32	32	32	32	32
1580	0.773	0.957	0.951	0.978	1.068	1.280	1.055	0.730	0.766	0.756	33	33	33	33	33	33	33	33	33	33
1590	0.725	0.919	0.661	0.747	0.663	0.876	0.875	1.021	0.833	1.018	33	33	33	34	34	34	34	34	34	34
1600	0.897	0.822	0.624	0.869	0.803	0.766	0.732	1.061	1.110	0.953	34	34	34	35	35	35	35	35	35	35
1610	0.953	0.822	1.132	0.975	0.882	0.907	1.267	1.099	0.908	1.496	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1620	1.090	1.024	0.864	1.020	0.825	1.029	0.928	1.005	1.054	0.892	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1630	0.858	0.998	1.035	0.906	1.080	0.652	0.770	1.167	1.071	0.958	35	35	35	35	35	35	35	35	35	35
1640	1.000	1.049	1.245	1.159	1.011	0.965	0.925	0.916	1.131	1.157	35	35	35	36	36	36	36	36	36	36
1650	0.898	1.026	0.887	1.149	1.202	1.297	0.883	0.920	1.013	0.897	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1660	1.041	0.809	0.858	0.701	1.204	1.081	0.964	0.725	1.034	1.041	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1670	0.975	0.978	1.059	1.043	1.104	1.157	1.162	1.224	1.358	1.156	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1680	1.052	0.830	0.888	0.964	1.179	1.148	1.437	0.865	1.143	1.053	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1690	0.854	1.117	1.250	1.073	1.078	1.118	1.075	1.174	0.905	0.841	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1700	0.975	1.247	0.887	1.136	0.812	1.040	1.060	1.215	1.191	1.065	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1710	1.031	1.042	1.201	1.095	1.153	1.371	0.856	0.736	1.151	0.870	37	37	37	37	37	37	37	37	36	36
1720	0.759	0.795	0.855	0.761	0.979	0.851	0.894	1.019	1.000	1.308	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
1730	1.070	0.963	0.937	0.824	0.945	0.892	0.879	1.036	1.075	1.119	36	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1740	0.899	0.818	0.682	0.913	0.812	0.966	0.918	1.032	0.728	0.935	37	37	37	37	37	37	37	37	37	37
1750	1.247	1.048	1.097	0.991	0.909	0.975	1.058	0.952	1.166	1.320	37	37	37	37	37	37	35	35	35	35
1760	1.021	1.185	1.246	1.132	1.001	1.024	0.920	0.957	0.984	0.922	35	35	35	35	35	35	35	35	34	35
1770	0.895	0.844	0.792	0.994	0.956	1.149	0.860	1.056	1.103	1.020	35	36	36	36	36	36	36	36	36	36
1780	0.946	0.860	1.008	0.931	1.179	1.145	1.074	1.173	1.100	1.029	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
1790	1.050	0.838	0.557	0.858	0.852	0.727	0.892	0.784	0.891	0.826	36	36	37	37	37	37	37	37	37	37

Année	Chronologie standardisée (polynômes)										Nombre d'arbres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1800	1.062	1.108	1.285	1.166	0.887	1.229	1.075	1.372	1.283	1.163	37	.36	.36	.36	.36	.33	.33	.33	.33	.33
1810	1.110	1.169	1.034	1.030	0.925	1.007	1.030	1.104	0.872	1.092	33	.33	.33	.33	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1820	0.988	0.795	0.929	1.087	1.032	1.075	1.200	1.285	1.428	1.085	35	.35	.35	.35	.35	.35	.34	.34	.34	.34
1830	1.162	0.968	1.290	1.121	1.200	1.202	1.087	1.177	0.974	0.980	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1840	0.943	0.632	0.888	0.973	0.964	1.062	0.971	0.826	0.872	0.794	34	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.34	.34
1850	0.907	1.080	1.060	0.950	1.002	1.220	1.252	1.236	1.099	1.172	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1860	1.204	1.205	1.135	1.041	1.023	1.127	1.112	1.014	0.922	0.761	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.33	.33	.34
1870	0.733	0.843	1.013	0.973	1.044	0.982	1.000	0.829	0.973	0.976	34	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1880	0.906	1.054	1.096	1.037	1.096	1.182	1.254	0.887	1.068	1.288	32	.32	.32	.32	.32	.32	.31	.31	.31	.31
1890	0.995	0.858	1.204	1.049	1.122	1.062	1.202	1.098	0.946	1.017	31	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1900	0.850	1.021	1.079	1.206	1.252	0.836	0.891	0.859	0.961	0.931	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.31
1910	1.041	1.035	1.168	1.053	0.818	0.916	0.829	0.883	1.007	0.714	31	.31	.31	.31	.31	.32	.32	.32	.32	.32
1920	0.519	0.692	0.760	0.873	0.907	0.932	1.152	1.174	1.342	1.191	32	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1930	1.307	1.193	1.080	1.240	1.023	0.919	0.898	0.981	0.893	1.126	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1940	0.940	1.043	1.225	1.104	0.764	1.035	1.016	0.875	0.748	0.941	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1950	0.908	0.911	1.028	0.952	0.935	0.952	0.897	1.009	1.127	0.990	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1960	0.849	1.012	0.815	0.836	1.179	1.246	1.029	1.081	1.016	1.050	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1970	1.079	0.878	1.180	1.133	0.994	1.037	0.941	1.124	1.092	1.105	31	.31	.30	.30	.30	.30	.30	.30	.30	.29
1980	1.042	0.766	0.856	0.852	0.831	0.914	0.979	0.905			29	.29	.29	.29	.29	.29	.28	.26		

ANNEXE D

Liste des indices de la chronologie résiduelle

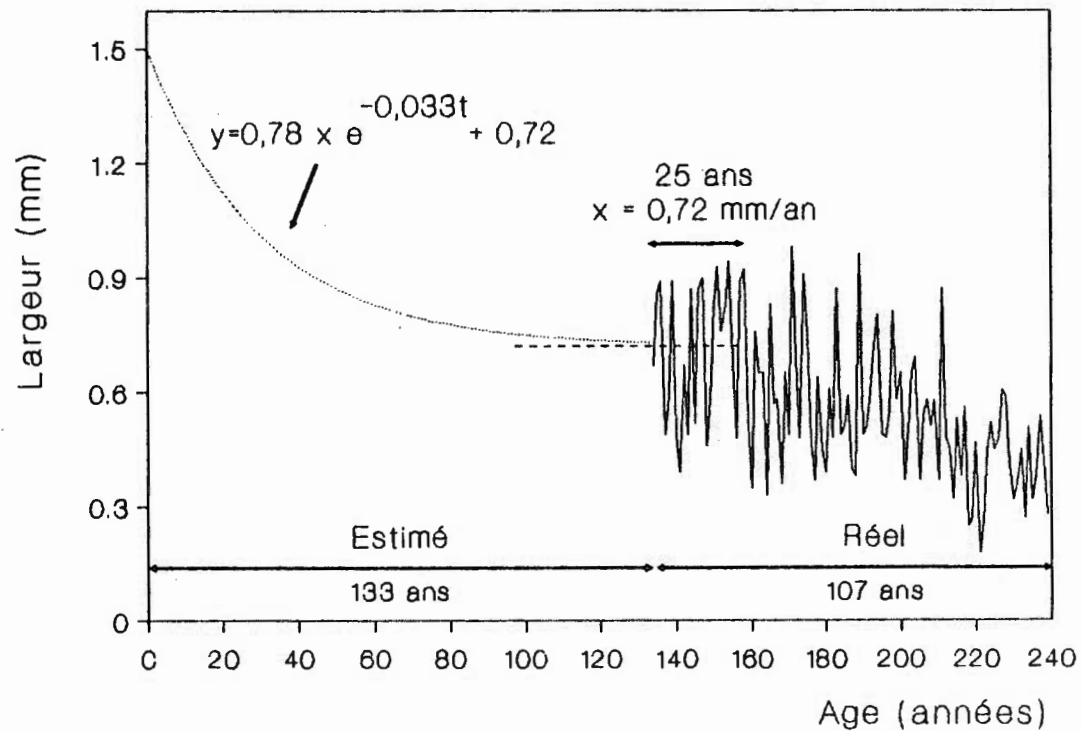
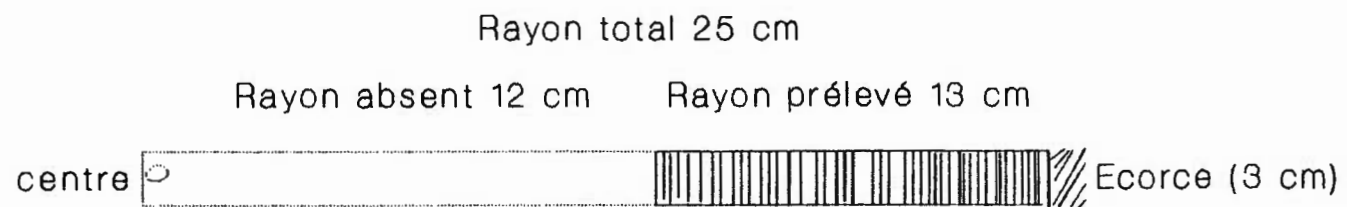
Année	Chronologie standardisée (modélisation AR(1))										Nombre d'arbres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1180								-0.392	-0.295	-0.031							1	1	1	1
1190	-0.119	0.024	-0.165	-0.198	-0.147	-0.273	-0.156	-0.016	-0.118	0.212	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
1200	0.009	-0.115	0.123	0.022	0.428	0.056	0.616	0.236	0.122	0.210	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
1210	0.033	0.168	0.137	-0.098	0.033	0.016	0.264	-0.072	-0.120	-0.275	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1220	0.192	-0.196	-0.259	-0.053	-0.198	-0.205	0.068	-0.168	0.112	-0.097	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
1230	0.072	-0.148	-0.177	-0.128	-0.220	-0.373	0.021	-0.002	-0.187	0.021	2	2	2	3	5	5	5	5	5	5
1240	0.094	0.116	-0.102	0.042	-0.036	-0.082	-0.161	0.026	0.128	0.148	5	5	5	5	5	5	6	6	6	6
1250	-0.131	-0.144	0.258	-0.075	0.007	-0.003	0.022	0.122	0.194	0.128	6	7	7	7	7	7	7	7	7	7
1260	-0.262	-0.265	-0.064	-0.051	-0.054	0.084	-0.007	0.129	0.141	-0.141	7	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1270	-0.118	0.094	-0.098	-0.139	0.087	-0.091	-0.020	0.080	-0.205	-0.163	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8
1280	-0.014	-0.135	-0.043	0.100	-0.227	0.020	-0.038	-0.361	0.085	-0.099	9	9	9	9	9	9	9	9	9	9
1290	0.044	-0.173	-0.036	-0.234	0.050	-0.142	0.009	-0.196	-0.028	-0.124	9	9	10	10	10	10	10	10	10	10
1300	0.055	-0.068	-0.012	0.108	0.044	-0.043	0.209	-0.132	-0.036	-0.103	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1310	0.006	0.090	0.175	-0.090	-0.081	-0.094	0.077	-0.191	0.014	-0.062	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1320	0.123	0.190	-0.021	-0.130	-0.082	0.002	0.109	-0.138	0.181	0.371	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1330	0.038	0.187	-0.026	0.214	0.244	0.206	-0.062	-0.014	0.163	-0.145	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
1340	0.050	0.308	0.074	0.108	0.419	0.150	0.179	-0.034	-0.062	-0.035	10	10	10	10	10	10	10	10	11	11
1350	0.167	0.144	0.170	0.164	0.325	-0.068	-0.186	0.331	-0.236	0.101	11	11	11	11	11	12	12	12	12	12
1360	0.081	-0.019	0.004	0.124	0.161	0.028	0.171	-0.044	0.095	0.064	13	13	13	13	13	13	13	13	13	13
1370	-0.102	0.064	0.203	-0.047	-0.013	0.400	0.182	0.161	0.277	-0.028	13	13	13	13	13	13	14	15	15	15
1380	-0.137	0.317	0.034	-0.017	-0.135	0.021	-0.028	0.079	0.008	-0.034	16	16	17	17	17	17	17	17	17	17
1390	-0.017	0.097	-0.105	0.386	-0.327	0.103	0.241	-0.284	0.521	-0.333	17	18	18	18	18	18	18	18	18	18
1400	-0.101	0.353	0.124	-0.290	0.105	0.169	0.007	-0.057	-0.252	0.150	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
1410	0.119	-0.213	0.055	0.264	0.163	-0.109	0.064	-0.134	-0.059	0.151	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
1420	-0.040	-0.184	0.267	-0.197	0.252	-0.118	0.131	0.011	0.039	-0.244	18	19	19	19	19	19	19	19	19	19
1430	-0.029	0.127	0.029	0.076	-0.266	0.224	-0.134	0.182	0.251	-0.115	19	19	19	19	19	19	19	19	19	19
1440	-0.031	0.109	-0.302	-0.102	0.203	-0.007	-0.024	-0.002	-0.020	-0.019	19	19	19	19	19	19	20	20	19	19
1450	0.107	-0.016	0.039	-0.243	0.053	0.030	0.041	0.060	-0.065	-0.174	19	19	20	20	20	20	20	20	20	21
1460	0.248	-0.083	-0.030	-0.284	0.008	-0.000	0.093	0.171	-0.211	0.050	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
1470	-0.127	0.138	-0.046	-0.291	-0.122	0.127	0.022	-0.248	-0.079	-0.017	22	22	22	22	22	23	24	24	24	24
1480	-0.005	-0.093	-0.276	0.067	-0.051	0.026	-0.062	-0.380	-0.066	-0.190	24	24	24	24	24	24	24	24	24	24

Année	Chronologie standardisée (modélisation AR(1))										Nombre d'arbres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1490	0.070	0.164	-0.076	-0.237	-0.092	-0.228	-0.081	0.195	0.049	-0.155	24	.24	.24	.24	.24	.24	.24	.24	.24	.24
1500	0.087	-0.184	0.007	0.059	0.209	-0.069	0.226	0.072	0.194	0.001	24	.24	.25	.26	.26	.26	.26	.26	.26	.26
1510	-0.128	0.144	-0.019	0.086	0.084	0.018	0.084	-0.047	0.071	-0.033	28	.28	.28	.28	.28	.29	.29	.29	.30	.31
1520	0.236	0.177	-0.009	-0.049	-0.131	0.165	0.094	0.151	-0.084	0.089	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1530	-0.270	-0.055	-0.025	-0.105	0.100	0.283	0.167	-0.211	-0.137	-0.058	31	.31	.31	.31	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1540	0.214	-0.074	0.028	0.159	-0.088	0.030	-0.109	0.030	-0.068	-0.044	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1550	-0.273	0.006	0.099	-0.075	0.123	0.059	-0.048	-0.060	-0.120	-0.079	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1560	-0.064	0.063	-0.261	-0.020	-0.003	-0.028	-0.080	0.023	0.041	-0.199	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1570	-0.008	0.116	-0.216	0.230	0.156	-0.149	0.369	-0.318	-0.135	-0.124	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1580	-0.081	0.094	-0.024	0.007	0.081	0.238	-0.116	-0.304	-0.070	-0.103	33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33	.33
1590	-0.127	0.085	-0.290	-0.047	-0.184	0.080	-0.050	0.096	-0.180	0.119	33	.33	.33	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1600	-0.114	-0.116	-0.268	0.097	-0.118	-0.115	-0.126	0.224	0.072	-0.115	34	.34	.34	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35
1610	-0.019	-0.150	0.239	-0.106	-0.104	-0.022	0.323	-0.064	-0.153	0.552	35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35
1620	-0.213	-0.031	-0.152	0.102	-0.188	0.135	-0.090	0.047	0.050	-0.142	35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35
1630	-0.076	0.084	0.036	-0.116	0.136	-0.398	-0.018	0.306	-0.032	-0.086	35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35
1640	0.025	0.049	0.214	0.009	-0.086	-0.043	-0.054	-0.039	0.181	0.077	35	.35	.35	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36
1650	-0.198	0.087	-0.130	0.217	0.111	0.173	-0.299	-0.010	0.061	-0.112	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1660	0.103	-0.216	-0.026	-0.213	0.385	-0.044	-0.086	-0.254	0.201	0.020	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1670	-0.051	-0.008	0.072	0.006	0.076	0.093	0.066	0.125	0.221	-0.063	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1680	-0.043	-0.203	-0.009	0.031	0.201	0.038	0.346	-0.402	0.224	-0.035	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1690	-0.179	0.206	0.177	-0.079	0.033	0.069	0.003	0.127	-0.201	-0.102	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1700	0.071	0.261	-0.264	0.204	-0.271	0.154	0.035	0.178	0.059	-0.051	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1710	-0.010	0.023	0.174	-0.028	0.095	0.277	-0.370	-0.177	0.311	-0.223	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.36	.36
1720	-0.163	-0.058	-0.021	-0.151	0.124	-0.137	-0.016	0.083	-0.013	0.307	36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36
1730	-0.118	-0.080	-0.041	-0.138	0.052	-0.075	-0.056	0.108	0.052	0.073	36	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1740	-0.174	-0.121	-0.208	0.106	-0.136	0.079	-0.062	0.082	-0.292	0.100	37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37
1750	0.286	-0.103	0.067	-0.068	-0.087	0.030	0.073	-0.084	0.194	0.218	37	.37	.37	.37	.37	.37	.35	.35	.35	.35
1760	-0.175	0.172	0.132	-0.018	-0.080	0.022	-0.095	0.005	0.010	-0.069	35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.34	.35
1770	-0.058	-0.093	-0.114	0.120	-0.041	0.175	-0.231	0.141	0.068	-0.043	35	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36
1780	-0.067	-0.108	0.093	-0.074	0.220	0.035	-0.015	0.127	-0.006	-0.033	36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36	.36
1790	0.032	-0.193	-0.345	0.127	-0.062	-0.183	0.057	-0.151	0.022	-0.109	36	.36	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37	.37

Année	Chronologie standardisée (modélisation AR(1))										Nombre d'arbres									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1800	0.167	0.069	0.219	-0.008	-0.215	0.297	-0.065	0.326	0.055	-0.010	37	.36	.36	.36	.36	.33	.33	.33	.33	.33
1810	0.010	0.101	-0.070	0.009	-0.094	0.052	0.025	0.085	-0.192	0.169	33	.33	.33	.33	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1820	-0.069	-0.199	0.053	0.130	-0.022	0.055	0.154	0.163	0.254	-0.176	35	.35	.35	.35	.35	.35	.34	.34	.34	.34
1830	0.110	-0.131	0.308	-0.056	0.125	0.079	-0.036	0.123	-0.135	-0.005	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1840	-0.046	-0.334	0.111	0.041	-0.021	0.083	-0.068	-0.157	-0.023	-0.129	34	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.35	.34	.34
1850	0.032	0.136	0.010	-0.087	0.032	0.218	0.117	0.082	-0.045	0.111	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.34
1860	0.099	0.080	0.009	-0.042	-0.002	0.112	0.034	-0.055	-0.087	-0.193	34	.34	.34	.34	.34	.34	.34	.33	.33	.34
1870	-0.122	0.004	0.108	-0.036	0.060	-0.046	0.010	-0.172	0.076	-0.008	34	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1880	-0.081	0.110	0.062	-0.022	0.073	0.123	0.143	-0.268	0.136	0.246	32	.32	.32	.32	.32	.32	.31	.31	.31	.31
1890	-0.181	-0.140	0.290	-0.076	0.091	-0.013	0.163	-0.026	-0.114	0.049	31	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32
1900	-0.161	0.111	0.065	0.157	0.126	-0.318	-0.009	-0.076	0.046	-0.046	32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.32	.31
1910	0.082	0.009	0.146	-0.050	-0.215	0.026	-0.120	-0.014	0.077	-0.290	31	.31	.31	.31	.31	.32	.32	.32	.32	.32
1920	-0.308	-0.016	-0.053	0.018	-0.016	-0.012	0.193	0.080	0.236	-0.018	32	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1930	0.190	0.005	-0.039	0.191	-0.124	-0.095	-0.054	0.042	-0.096	0.190	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1940	-0.137	0.079	0.198	-0.034	-0.300	0.178	-0.006	-0.136	-0.177	0.094	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1950	-0.057	-0.034	0.082	-0.066	-0.037	-0.009	-0.075	0.071	0.121	-0.088	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1960	-0.146	0.103	-0.194	-0.052	0.277	0.137	-0.121	0.062	-0.034	0.039	31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31	.31
1970	0.048	-0.171	0.253	0.022	-0.088	0.040	-0.082	0.159	0.017	0.048	31	.31	.30	.30	.30	.30	.30	.30	.30	.29
1980	-0.023	-0.260	-0.002	-0.061	-0.080	0.017	0.030	-0.083			29	.29	.29	.29	.29	.29	.28	.26		

ANNEXE E

Exemple de l'estimation de l'âge des arbres
à partir d'une carotte incomplète

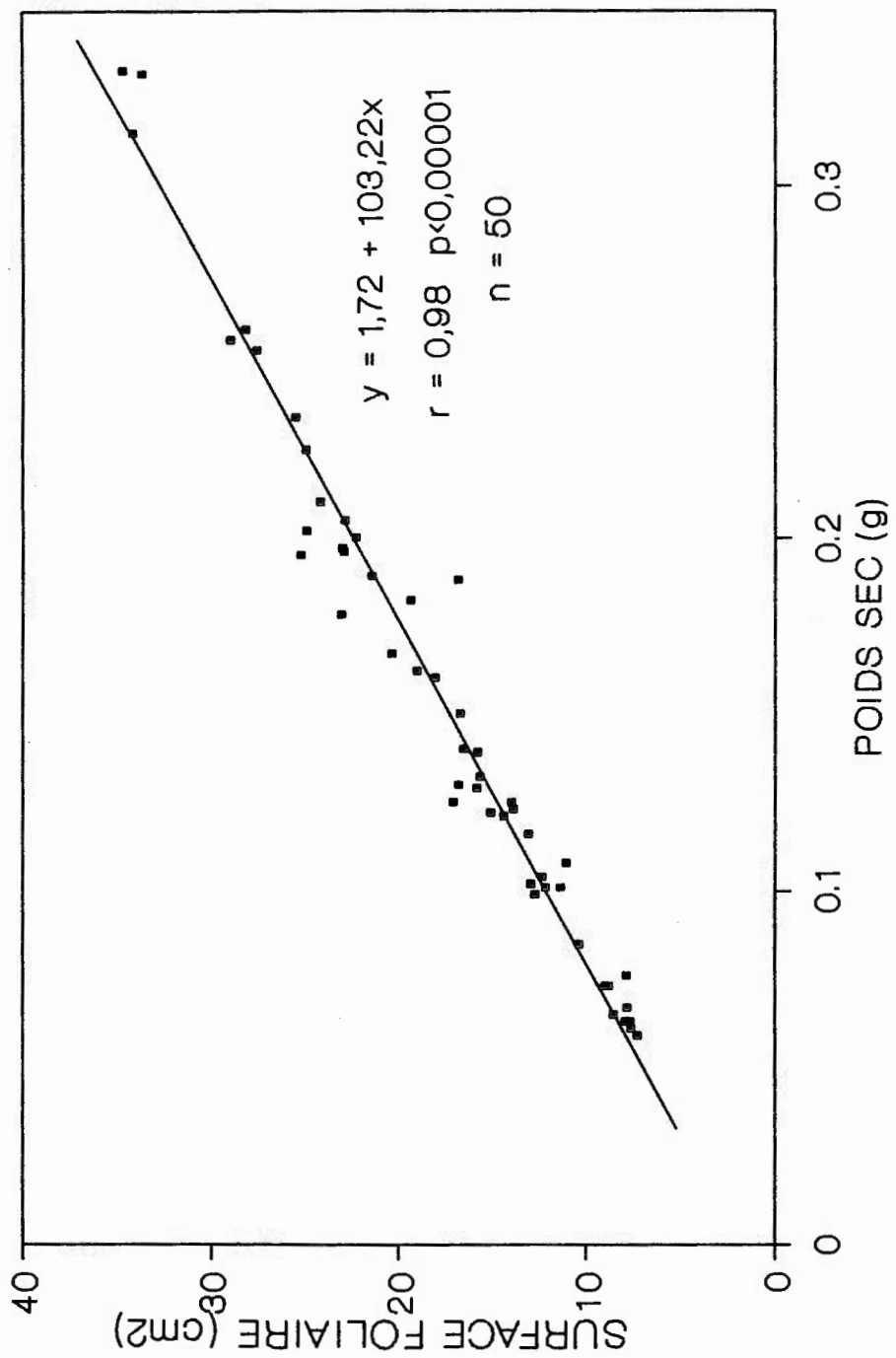


Age minimum de l'arbre: 107 ans

Age estimé: 240 ans (133+107)

ANNEXE F

Droite de régression permettant d'estimer la surface
foliaire d'un rameau en fonction de son poids sec



ANNEXE G

Droite de régression permettant d'estimer la surface foliaire
d'un arbre en fonction de l'estimation visuelle de son volume foliaire

